

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

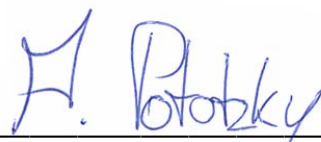
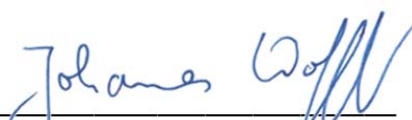
ABSCHLUSSBERICHT

zum Teilprojekt des DLR im Verbund InGa

Innovative Galley

Zuwendungsempfänger:	DLR
Förderkennzeichen:	20K1103C
Vorhabenbezeichnung:	Innovative Galley (InGa)
Laufzeit des Vorhabens:	01.07.2014 bis 30.09.2015
Berichtszeitraum:	01.07.2014 bis 30.09.2015

Erstellt von: Alexander Pototzky, Johannes Wolff, Dirk Holzhüter

Datum: 22.03.2016
A. Pototzky
J. Wolff

Prof. Dr. Christian Hühne


D. Holzhüter

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung.....	17
1.1	Aufgabenstellung	17
1.1.1	Verbundprojekt Innovative Galley	17
1.1.2	Teilprojekt des DLR.....	17
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	18
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	19
1.3.1	AP1 – Erdungskonzepte	21
1.3.2	AP2 - Gewichtsreduzierte Panel	21
1.3.3	AP3 – LED Integration (UA ZCC)	21
1.3.4	AP4 – OLED Integration.....	22
1.4	Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand.....	22
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	22
2	Eingehende Darstellung: AP1 – Erdungskonzepte	23
2.1	Konzeptfindungsphase.....	23
2.1.1	Kupfer-Folie	24
2.1.2	Plasmabeschichten	25
2.1.3	Kupfer-Mesh	27
2.1.4	Bewertung und Auswahl der Konzepte.....	28
2.2	Konzeptvalidierung an einem Sandwichbauteil	28
2.3	Elektrische Anbindung	30
2.3.1	Herkömmliche Kontaktierung.....	30
2.3.2	Nietkonzept.....	30
2.3.3	Nietauswahl	31
2.4	Erarbeitung des Referenzmodelles	32
2.5	Verbesserung der Robustheit.....	33
2.6	Trommelschälversuch	36
2.7	Seriennahe Konzeptrealisierung	38
2.8	Herstellung des Demonstrators.....	39
3	Eingehende Darstellung: AP3 und AP4 - LED und OLED Integration	41
3.1	Allgemeine Arbeiten.....	41
3.2	Austauschbarkeit der Leuchtmittel.....	42
3.3	Lichtintegration - Leuchten Demonstratoren.....	44
3.4	Spot Light.....	45
3.4.1	Fertigung	45
3.4.2	Integration in Demonstrator	47
3.5	Area Work Light.....	48
3.5.1	Fertigung	49
3.5.2	Integration in Demonstrator	49
3.6	Top Panel Accent Light	53
3.6.1	Fertigung	53

3.6.2	Integration in Demonstrator	54
3.7	<i>Demonstrator Galley</i>	55
4	Eingehende Darstellung – AP2 – Gewichtsreduzierte Panel.....	56
4.1	<i>Motivation</i>	56
4.1.1	Sandwichprinzip	57
1.1.1.1	Verbindungsarten von Sandwichhautfeldkonstruktionen	58
4.1.2	Mechanische Funktionen von lokalen Lastenleitungen in Sandwichelementen	60
4.1.3	Insertkörper für lokale lösbare Verbindungen in Sandwichtragwerken.....	61
4.1.4	Die Komponenten einer separierbaren Insertlastenleitung	62
4.1.5	Insertkörper	62
4.1.6	Grundbelastungen von Insertelementen	65
4.1.7	Vordimensionierungsempfehlungen für lösbare Sandwichverbindungen.....	65
4.1.8	Insertmechanik	66
4.2	<i>Zu untersuchende Sandwichverbindungsstellen im Projekt InGa</i>.....	67
4.2.1	Aufhängungen der Galley	67
4.2.2	Nut-Zapfen-Verbindungen im Tragwerk	68
4.2.3	Anbindungspunkte für die Erdungsverkabelung.....	68
4.2.4	Lastenleitungen in der Sandwichfläche	69
4.2.5	Lastenleitungen in der Sandwichstirnfläche	70
4.3	<i>Spezifikation der Halbzeuge und Komponenten</i>	71
4.3.1	Sandwichtypen 616 HC und 618 HC	71
4.3.2	Spezifikation Klebstoff: 2K 3M Scotch Weld 9300 B/A FST.....	76
4.3.3	Spezifikation der lokalen Verstärkungen (sog. „Doubler“).....	78
4.3.4	Spezifikation Materialien für die innovativen Insertkörper.....	79
4.4	<i>Untersuchte Inserttypen im Projekt InGa</i>	80
4.4.1	Konventionelle Inserttypen.....	81
4.4.2	Innovative Inserttypen	90
4.4.3	Topfinsert.....	90
4.4.4	Schraubinsert	105
4.4.5	Integrierte Inserts	117
4.4.6	Onserts	141
4.4.7	Randlastenleitungskonzept.....	150
4.5	<i>Experimentelle Ermittlung der Belastungsfähigkeit der Insertkonzepte</i>.....	173
4.5.1	Allgemeine Testgrundlagen	173
4.5.2	Sandwichprobekörper	173
4.5.3	Testeinrichtungen.....	177
4.5.4	Durchführung.....	178
4.5.5	Dokumentation	179
4.5.6	Berechnung der Erstversagenslasten und statistische Auswertung	179
4.6	<i>Massenermittlung der Komponenten der Insertlastenleitungen</i>.....	181
4.6.1	Massen der Sandwichtypen 618 HC und 616 HC.....	182
4.6.2	Massen der Insertkörper	182

4.6.3	Massen der lokalen Verstärkungen („Doubler“)	183
4.6.4	Massen der gesamten Insert-Sandwichprobekörper	183
4.6.5	Massen des Klebstoffs	183
4.7	Verbindungsgüte als Leistungsmaß	183
4.8	Demonstratoren der Insertkonzepte	185
4.8.1	Handdemonstratoren DLR	185
4.8.2	Innovative Insertkonzepte in der Demonstratorgalley	186
4.9	Aussicht, Empfehlung für weitere Tätigkeiten	187
4.9.2	Modellbildungen für lokale Lasteinleitungen mit Insertkörpern	187
4.9.3	Weiterentwicklung der Testeinrichtungen	187
4.9.4	Testdokumentation	188
5	Literaturverzeichnis	189

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Arbeitspaketstruktur WP1 - Innovative Panel	20
Abb. 2: Arbeitspaketstruktur WP2 - Integrierte Lichtsysteme.....	20
Abb. 4: Herkömmliche Verkabelung auf einer Galley Rückwand	23
Abb. 5: Benötigte Zusatzelemente.....	23
Abb. 6: Selbstklebende Kupferfolie.....	24
Abb. 7: Funktionsprinzip Atmosphärendruck-plasmas (Quelle: Reinhausen Plasma).....	25
Abb. 8: Geometriefreiräume bei der Plasmabe-schichtung	25
Abb. 9: Leiterbahnbeschichtung auf einem Panel.....	26
Abb. 10: Fertig beschichtete GFK Panels	26
Abb. 11: DLR Logo welches mithilfe eines Maske erstellt wurde	26
Abb. 12: Verschiedene Meshvariationen [Aero-consultants.ch]	27
Abb. 13: Detailansicht des Kupfer-meshes [Aero-consultants.ch].....	27
Abb. 14: Geometrische Verhältnisse des Flächenwiderstandes.....	27
Abb. 15: fertig konsolidiertes Sandwichpanel.....	28
Abb. 16: Biegeversuch Panel Vorbereitung.....	29
Abb. 17: Fertiges und ausgehärtetes Musterbauteil.....	29
Abb. 18: Herkömmlicher Aufbau eines Erdungs-punktes	30
Abb. 19: Integralschraube der Firma Ejot.....	30
Abb. 20: Prinzipieller Nietvorgang	31
Abb. 21: Testaufbau um den Widerstand der Nietpaarungen zu bestimmen.....	31
Abb. 22: Detailansicht des Testaufbaus	31
Abb. 23: Überführung eines konventionellen Erdungsstrangs in einen Flächenschutzleiter	32
Abb. 24: Coupon Referenz Modell der Erdungsverkabelung.....	33
Abb. 25: Verstärkung des elektrischen Kontaktpunktes.....	34
Abb. 26: Einspannung in der Zug-Prüfmaschine.....	34
Abb. 27: Kraft Weg Diagramm der Ausreißversuche	35
Abb. 28: Ausgerissener Kabelschuh.....	36
Abb. 29: Einspannung Trommelschälversuch.....	37
Abb. 30: Die für den Trommelschälversuch vorberei-tete Probe	37
Abb. 31: Prüfprotokoll Trommelschälversuch.....	37
Abb. 32: Drapiertes Kupfermesh auf dem Kern	38
Abb. 33: Kupfermesh und Kunststoffüll	38
Abb. 34: Drapieren der Glasfaserdeckschicht.....	39
Abb. 35: Fertig besäumte Bonding Rückwand	39
Abb. 36: Detailansicht des geschlitzten Panels.....	39
Abb. 37: Konventioneller Erdungsaufbau einer Galleyrückwand.....	40
Abb. 38: Modifiziertes Bondingpanel der Demo-Galley	40
Abb. 39: Detailansicht des Bondingpanels und der Kontaktstellen.....	40
Abb. 40: erstes Leuchtenkonzept	41
Abb. 41: erweitertes Leuchtenkonzept	41
Abb. 42: Aufbau des Light Guides [Quelle: Zodiac Cabin Controls]	42
Abb. 43: Integrationsmöglichkeiten des Lightguides	43
Abb. 44: Strukturintegrierter Light Guide	44
Abb. 45: Explosionsdarstellung Spot Light	45
Abb. 46: Einkleben des Trägerringes	46
Abb. 47: Verklebevorgang Trägerring.....	46
Abb. 48: Mit Klebstoff gefüllte Wabenstruktur	47
Abb. 49: Fertiger Spotlight Demonstrator	47
Abb. 50: Klebstoffverfüllter Kabelkanal inklusive der benötigten Maskierung	48

Abb. 51: Area Work Light.....	48
Abb. 52: Querschnitt durch das Panel.....	49
Abb. 53: Probefräsung für Area Work Light.....	49
Abb. 54: Fräsvorgang des Area Work Light	50
Abb. 55: erstelle Taschen in dem Panel des Area Work Light.....	50
Abb. 56: Verklebte Aluminiumleitbleche	51
Abb. 57: Maskieren der Glasdeckschicht	51
Abb. 58: Aufgetragener Klebstoff auf der Glasdeckschicht.....	52
Abb. 59: Fertiges Area Work Light.....	52
Abb. 60: Schematische Darstellung des TPAL.....	53
Abb. 61: Schrittweiser Aufbau des TPAL	54
Abb. 62: Ergebnis des Ausgehärteten TPAL Panels.....	54
Abb. 63: Fertig montiertes TPAL an der Galley.....	55
Abb. 64: Fertige Demonstrator Galley	55
Abb. 65: Positionen von Flugzeugküchen in einem Passagierflugzeug A330.....	56
Abb. 66: Aufbau einer Flugzeugküche aus Sandwichelementen.....	56
Abb. 67: Formentwicklung des Querschnitts eines Kragbalkens nach dem Prinzip der lastgerechten Materialanordnung.	57
Abb. 68: Ersetzen des Stegs durch ein Material mit geringer Dichte.	58
Abb. 69: Vereinfachung der Normal- und Schubspannungs-verteilung im Sandwichbalken (2). 58	
Abb. 70: Steifigkeitszugewinn durch Erhöhung des Abstands der Deckschichten bei gleichem Gewicht (3).	58
Abb. 71: Beispiele für nicht mehr lösbare Sandwichverbindungen, (4), (2), (6), (7).....	59
Abb. 72: Beispiele für demontierbare Sandwich-Sandwichverbindungen	60
Abb. 73: Versagen des Kernmaterials bereits durch die Schraubenklemmkraft.	60
Abb. 74: Lokale Schädigung des Sandwichelements durch die lokale, ungestützte Einleitung von strukturellen Lasten (Schraube unter Biegemoment, Sandwich unter Drucklast) (12).....	60
Abb. 75: Einzelbestandteile einer typischen Insertverbindung.	62
Abb. 76: Grundbelastungsarten auf Insertlasteinleitungen (15) (S. 69).....	65
Abb. 77: Konstruktive Vermeidung von Biegemomenten auf die Insertlasteinleitungen. Beispiel: Insert-Doppelreihenordnung in einer T-Stoß-Verbindung (15), (S. 160).	65
Abb. 78: Empfehlungen für die Auswahl von Insertarten unter unterschiedlichen Belastungsarten (20)	66
Abb. 79: Beispiel für Deckenbefestiger (Klammern) im Dachpaneel einer Galley in Sandwichbauweise	67
Abb. 80: Positionen von unlösbaren Nut-Zapfen-Verbindungen in einer Galley in Sandwichbauweise	68
Abb. 81: Beispiel für die Befestigung von elektrischen Leitungen an der Rückseite einer Galley in Sandwichbauweise	69
Abb. 82: Bereiche lokaler Krafteinleitungen in der Sandwichfläche.....	69
Abb. 83: Trolley-Anschlagpuffer als Beispiel einer lokalen Krafteinleitung, die mittels drei verlorener Inserts in der Fläche der Sandwichrückwand befestigt ist.....	69
Abb. 84: Verriegelungsknebel in den Sandwichplattenstirnbereichen zur Fixierung von Containern und Kücheneinsätze als Lasteinleitungspunkte im Sandwichrand	70
Abb. 85: Separierbare Sandwich-T-Stoßverbindung.....	70
Abb. 86: Durch Herstellungseise der Honigwabenmaterials bedingter Anteil doppelter Wabenwände in der L-Richtung.....	72
Abb. 87: Unterschiedliche mechanische Wirkweisen von Schraubverbindungen (27).	74
Abb. 88: Verwendeter 2K-Klebstoff 9300 B/A FST der Fa. 3M Scotch Weld in einer Doppelkartusche.	76

Abb. 89: Klebstoff in pneumatischer Kartuschenpresse, automatisches Mischen der Klebstoffkomponenten mit Hilfe einer vorgeschraubten Mischdüse.	76
Abb. 90: Auftragen und Verstreichen des Klebstoffs mit einer Cutterklinge.	77
Abb. 91: Kunststoff-Zahnleiste als Option zum Verteilen und Einstellen der richtigen Klebstoffmenge.	77
Abb. 92: Fixierung der Doubler durch Schraube, Kotflügelscheibe (M5 x 35 mm) und Leimklammern auf einem Topfinser-Sandwichtestkörper für Sheartests.	78
Abb. 93: Fixierung der Doubler durch Schraubzwingen und Leimklammern auf einem GFK-Klötzchen-Testkörper für Pull-Out-Tests.	78
Abb. 94: Verbindungsgüte über Gewicht der auf Zug belasteten Insertverbindungen.	83
Abb. 95: Verbindungsgüte über Gewicht der auf Schub belasteten Insertverbindungen.	84
Abb. 96: Beispiel für ein unerwünschtes, zu frühes Kernschubversagen der Sandwichplatte noch vor der Schädigung des Onserts aufgrund unzureichender Größe der Einspannfläche bzw. zu kleinem Testsandwichpaneel.	86
Abb. 97: Anderes Versagensbild der Onsertverbindung (kohäsives Versagen des Klebstoffs auf Zug) bei Verwendung einer geeigneten Sandwichpaneelgröße.	86
Abb. 98: Ein sog. „Doubler“, eine eigentlich lokale Verstärkung des Lasteinleitungsbereichs durch eine Aluminiumplatte, reicht bei den 1993er-Tests der Fa. SELL GmbH bis unter die Einspannungen des Testaufbaus.	86
Abb. 99: Unterschiedliche Dimensionen der Doubler (lokale Deckschichtverstärkungen) für die Pull-out- (links) und Shear-Testkörper (rechts) der Schraubinsert im Sandwichtyp 618 HC.	87
Abb. 100: Kraft-Weg-Verlauf einer Insertverbindung im Pull-Out-Test. Grüner Pfeil: Erstschädigungspeak durch Ablösen der oberen Deckschicht am Rand der Bohrung. Roter Pfeil: Maximallast bei Komplettversagen durch Druckbruch in der unteren Deckschicht des Sandwichpaneels.	88
Abb. 101: Erstversagen bzw. Erstschädigung bei einem Lastniveau von ca. 2,4 kN durch Ablösen der oberen Deckschicht bzw. „Abpellen“, vgl. auch Abb. 34, grüner Pfeil. (Probennummer: PO_TI_22mm_01.1_1/12).	88
Abb. 102: Zweitversagen des Sandwichpaneels durch Druckbruch der unteren Deckschicht bei einem Lastniveau von ca. 3,4 kN, vgl. Abb. 34, roter Pfeil. (Probennummer: PO_TI_22mm_01.1_1/12).	88
Abb. 103: Feste Installation z. B. eines Compartmentboards in der Galley mit Hilfe von Nut-Zapfen-Verbindungen (Mortise-and-tenon) (40).	90
Abb. 104: Schnitt durch einen Deckschichteinzug als Lasteinleitungspunkt (JFS bzw. „Joint face sheet-Design“).	91
Abb. 105: Iterationsschritte des CAD-Modells des Topfinserts.	91
Abb. 106: Prototyp des Topfinsertkonzepts.	91
Abb. 107: Parametrisiertes CAD-Modell des Topfinsertkonzepts aus Aluminium im Schnitt, Variante für den Sandwichtyp 616 HC.	91
Abb. 108: Schnittdemonstrator des Topfinsertkonzepts aus ULTEM 9085, in Sandwichtyp 616 HC.	91
Abb. 109: Aufstellen des oberen Kragens bei fehlender Stützung, Bsp. Topfinser CRES 22mm-Variante.	92
Abb. 110: Herstellung eines ebenen Kragens durch Abdrehen von Übermaßmaterial.	92
Abb. 111: Topfinser CRES mit teilweise entfernter Stützkonstruktion, erste Version.	93
Abb. 112: Topfinserts inkl. der endgültigen Form der Stützkonstruktion.	93
Abb. 113: CRES -Varianten der Topfinserts mit 10 mm und 22 mm Höhe (für die Sandwichtypen 616 HC und 618 HC).	93
Abb. 114: Aluminiumvariante des 22 mm-Topfinsertkonzepts, hergestellt im kombinierten CNC-Dreh-Fräsverfahren.	94

Abb. 115: Bilder Kunststoffvariante des 10 mm- und 22 mm-Topfinsets, hergestellt im Rapid-Prototyping-Verfahren „SLS“ aus ULTEM 9085.	94
Abb. 116: Dimensionsmaße des Insertprototyps Topfinset Aluminium, 22 mm (für Sandwichtyp 618 HC).	95
Abb. 117: Dimensionsmaße des Insertprototyps Topfinset ULTEM 9085, 10 mm (für Sandwichtyp 616 HC).	95
Abb. 118: Dimensionsmaße Pull-Out-Testpaneel, 616 HC, 10 mm, Aluminium – und ULTEM 9085-Varianten des Topfinsetkonzepts.	96
Abb. 119: Dimensionsmaße Shear-Testpaneel, 616 HC, 10 mm Aluminium – und ULTEM 9085-Varianten des Topfinsetkonzepts.	96
Abb. 120: Dimensionsmaße Pull-Out-Testpaneel, 618 HC, 22 mm, Aluminium – und ULTEM 9085-Varianten des Topfinsetkonzepts.	96
Abb. 121: Dimensionsmaße Shear-Testpaneel, 618 HC, 22 mm Aluminium – und ULTEM 9085-Varianten des Topfinsetkonzepts.	96
Abb. 122: Fixierung und Verpressen der Topfinsets zur Aushärtung des Klebstoffs per Durchgangsschraube, Mutter und Kotflügelscheibe (M5 x 35 mm).	97
Abb. 123: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter transversaler Belastung (Pull-Out).	100
Abb. 124: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter flächenparalleler Belastung (Shear).	101
Abb. 125: Versagen der Schraube der Größe NAS 514 10-32 (4,8 mm Schaftdurchmesser) auf Scherung unter flächenparalleler Belastung.	102
Abb. 126: Aufbohren des Stecklochs auf 7 mm zur Aufnahme von Schrauben der Größe NAS 517 ¼“-28 UNF (Schaftdurchmesser ca. 6,35 mm).	102
Abb. 127: In die Zentralbohrung eingedrungener Klebstoff.	103
Abb. 128: Zylinderabsatz zur Vermeidung von Klebstoff in der Zentralbohrung (rote Pfeile). Verwendung einer Schraube mit flacher Kopfaufgabe in Übermaßsteckloch für radialen Toleranzausgleich (blaue Pfeile).	103
Abb. 129: Reste der Kernwaben auf der Innenseite der oberen Deckschicht.	103
Abb. 130: Zu großer Abstand des unteren Kragens der Topfinsets von der Oberseite der unteren Deckschicht.	103
Abb. 131: Mit z. B. aufgeschäumtem Epoxidharz gefüllter Hohlraum zwischen Topfinset und Sandwichkern zur Nutzung der Kernanbindung als zusätzlichen Lastpfad.	104
Abb. 132: Vorschlag für Weiterentwicklung des Topfinsets: Vertikale Ausrichtung der Topfwände, Anschluss der Topfwände an den Sandwichkern durch eine möglichst geringe Klebstoffmenge.	104
Abb. 133: Massiver Aluminiumblock inkl. sog. Keenserts (HeliCoil-Einsätze) als Krafteinleitung (41).	105
Abb. 134: Das zu ersetzende, konventionelle Insert 0127-0054-00000 für 10 mm-Sandwichplatten (36).	105
Abb. 135: CAD-Modells des Schraubinserts	106
Abb. 136: Montage eines Schraubinsertprototyps.	106
Abb. 137: Parametrisiertes CAD-Modell der 22 mm-Variante des Schraubinsertkonzepts im Schnitt.	107
Abb. 138: Endgültige Ausführung der Einzelteile der Schraubinserts aus Aluminium, 22 mm-Variante, hergestellt im spanabhebenden Verfahren (CNC-gesteuertes Drehen).	107
Abb. 139: Zusammengeschaubtes Schraubinsert, 10 mm-Variante.	107
Abb. 140: Schnittdemonstrator des Schraubinsertkonzepts mit lokaler Lastanbindung in einem Sandwichpaneel des Typs 618 HC.	107

Abb. 141: Dimensionsmaße des Insertprototyps Schraubinsert Aluminium, 22 mm (für Sandwichtyp 618 HC)	108
Abb. 142: Dimensionsmaße des Insertprototyps Schraubinsert Aluminium, 10 mm (für Sandwichtyp 616 HC)	108
Abb. 143: Dimensionsmaße Pull-Out-Testpaneel, 616 HC, 10 mm, beidseitig verstärktes Schraubinsertkonzept.	109
Abb. 144: Dimensionsmaße Shear-Testpaneel, 616 HC, 10 mm, beidseitig verstärktes Schraubinsertkonzept.	109
Abb. 145: Dimensionsmaße Pull-Out-Testpaneel, 618 HC, 22 mm, beidseitig verstärktes Schraubinsertkonzept.	109
Abb. 146: Dimensionsmaße Shear-Testpaneel, 618 HC, 22 mm, beidseitig verstärktes Schraubinsertkonzept.	109
Abb. 147: Fügen des Schraubinserts durch Zusammendrehen der beiden Trichterelemente auf die richtige Höhe	110
Abb. 148: Große radiale Toleranz durch Verschiebbarkeit des Inserthalbkörpers im Durchgangsloch des Sandwichpaneels.....	110
Abb. 149: Über die Insertkragenoberfläche hinausragende Klebstoffwulst.....	111
Abb. 150: Entfernen der überstehenden Bestandteile der Klebstofffrands mit einem Cuttermesser	111
Abb. 151: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter transversaler Belastung (Pull-Out).....	114
Abb. 152: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter flächenparalleler Belastung (Shear).....	115
Abb. 153: Einführung eines zusätzlichen Absatzes in den Trichterteilen des Schraubinserts zur präzisen Fixierung des Inserts in der Bohrung.	116
Abb. 154: Probleme durch Höhenversatz der Stirnfläche des Zentralzylinders zur Kragenoberfläche.....	116
Abb. 155: T-Devider zur räumlichen Trennung und Fixierung der Container in der Galley (42).	117
Abb. 156: Containeranschlag an der Rückseite einer Galley, befestigt mit Hilfe von drei Inserts (42).	117
Abb. 157: Fertigungskonzept der integrierten Inserts: Die Inserts werden noch vor Endfertigung des Sandwichs in den Sandwichwabenkern eingebracht.	118
Abb. 158: Konventionelle Montage von Insertlasteinleitungen in Sandwichpaneelen.	119
Abb. 159: KVT-Inserts als Ansatz zur Darstellung der „eingebackenen Inserts“.....	119
Abb. 160: Konventionelles Insert NAS 1835-08-11 im Sandwichverbund (35).	120
Abb. 161: Innovatives Insert mit Schaumvolumen und CFK-Faserumwicklung, integriert im Sandwichkern (43).	120
Abb. 162: KVT-Insert des Typs „bigHead Befestiger TwinDisk“	120
Abb. 163: Fertigungs- und Installationsschema des zweiten Konzeptansatzes.	120
Abb. 164: Schraubkonzept der Integrierten Inserts: Gewindebolzen- und Gewindebuchsen-Inserthalbkörper.	121
Abb. 165: In eine Kernausstanzung des Honigwabenkerns eingesetztes Gewindebolzenelement.	121
Abb. 166: Durch Zusammenschrauben der im Wabenkern fixierten Inserthalbkörper.....	121
Abb. 167: Fertige Verbindungsstelle nach dem Aufbringen und Aushärten der Deckschichten.	121
Abb. 168: Inserthalbkörper des Steckkonzepts. Durch Ausbohren des Buchsenelements M 10 kann das Gewindebuchsenelement der Größe M 6 eingesteckt werden.	123
Abb. 169: In die Kernwabe eingebrachtes Gewindebuchsenelement.	123

Abb. 170: Klebstoffapplikation auf den Zylinder des Gewindebuchsenelements.	123
Abb. 171: Die Kragen des in das Wabenhalbzeug eingesetzten Inserts stehen über die Wabenoberfläche hinaus.	123
Abb. 172: Eindrücken des Buchsenelements M 6 durch Zusammendrücken („Crushen“) der Waben in den Bereichen unter den Insertkragen.	123
Abb. 173: Ziel: Nach dem Eindrücken ist das Insert plan in den Wabenkörper integriert.	123
Abb. 174: Problematik des Zurückrutschens durch die Feder- bzw. Rückstellkraft der zusammengedrückten Waben unter den Insertkragen nach der Entlastung.	124
Abb. 175: Kontrolle des konzentrischen Sitzes aller Inserthalbkörper zueinander durch Andrücken der Deckschicht im Insertbereich.	124
Abb. 176: Konzeptskizze des Klickinserts.	125
Abb. 177: Zweite Konzeptstufe des Klickkonzepts. Der Rastmechanismus ist auf eine einstufige Rastung reduziert. Die mechanische Verbindung erfolgt anschließend durch Presspassung der Inserthalbkörper ineinander.	126
Abb. 178: Dritte Konzeptstufe des Klickkonzepts mit in die Pressbuchse integrierten Rastzähnen.	126
Abb. 179: Bearbeitung des Wabenkerns 1: Einspannung.	127
Abb. 180: Bearbeitung des Wabenkerns 2: Einbringen des Lochbilds für die Inserts.	127
Abb. 181: Bearbeitung des Wabenkerns 3: Reinigung und Entspannung.	127
Abb. 182: Einbringen der integrierten Inserts, Klickkonzept.	127
Abb. 183: Montageablauf und Funktionsprinzip des integrierten Inserts, Steckkonzept V2.	128
Abb. 184: Dimensionen der 616 HC-Sandwichprobekörper inkl. integriertem Insert (Steckkonzept) für Pull-Out-Versuche, Beispiel mit beidseitiger Deckschichtverstärkung.	130
Abb. 185: Dimensionen der 616 HC-Sandwichprobekörper inkl. integrierten Inserts (Steckkonzept) für Shear-Versuche, Beispiel mit beidseitiger Deckschichtverstärkung.	130
Abb. 186: Dimensionen der 618 HC-Sandwichprobekörper inkl. integriertem Insert (Schraubkonzept) für Pull-Out-Versuche, Beispiel mit beidseitiger Deckschichtverstärkung.	131
Abb. 187: Dimensionen der 618 HC-Sandwichprobekörper inkl. integrierten Inserts (Schraubkonzept) für Shear-Versuche (Beispiel mit beidseitiger Deckschichtverstärkung)	131
Abb. 188: Musterplan für eine Ableitung des Lochbilds sowie den Zuschnitt der Probekörper der integralen Insertkonzepte.	131
Abb. 189: Manuelles Ausstanzen der Löcher für die Inserts, Positionsfindung mit Hilfe eines Lochbildplots.	133
Abb. 190: Ausgestanztes Lochbild im Wabenhalbzeug.	133
Abb. 191: Endkontrolle der planen Position der Insertkragen.	133
Abb. 192: Auflegen der Prepreg-Deckschichten. Genauere Beschreibung des Lagenaufbaus siehe Abschnitt 0, Seite 72.	133
Abb. 193: Herstellung des Zugangs zur Zentralgewindebohrung der Inserts durch Aufbohren der Deckschichten mit einem Kegelsenker.	134
Abb. 194: Entgraten der Bohrungsänder mit Hilfe eines Handcutters.	134
Abb. 195: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter transversaler Belastung (Pull-Out).	139
Abb. 196: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter flächenparalleler Belastung (Shear).	139
Abb. 197: CAD-Modell und Realbeispiel einer Erdungskabelanbindung mit Insert, Schraube, Distanzbuchse und Klammer. (40)	141
Abb. 198: Onsert mit Kabelbinderaufnahme.	141
Abb. 199: Onsertkonzepte mit durchsichtigem Fuß zur UV-Aushärtung des Klebstoffs (44).	141

Abb. 200: Onserttyp CB4002 der Fa. Click Bond. Inc., mit dem Klebstoff 3M Scotch Weld 9300 B/A FST auf der Sandwichdeckschicht fixiert. Für den Aushärtvorgang wird das Insert über eine wiederverwertbare Kunststoffbrücke an seiner Position gehalten und angepresst [www.clickbond.com].	142
Abb. 201: Onsertsystem ONsert® der Fa. Böllhoff Verbindungstechnik GmbH & Co. KG. Das onsert wird mit UV-aushärtendem Klebstoff befestigt [www.boellhoff.de].	142
Abb. 202: Onsert der Serie CB4002 der Fa. Click Bond. Inc.	143
Abb. 203: Onsert der Serie CB4564 der Fa. Click Bond. Inc.	143
Abb. 204: Dimensionen des Pull-Out-Sandwichprobekörpers des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4002 V 3 CR 8	144
Abb. 205: Dimensionen des Shear-Sandwichprobekörpers des Typs 616 HC in Standardgröße mit Onserts des Typs CB4002 V 3 CR 8 mit Deckschichtverstärkung oben	144
Abb. 206: Dimensionen des Pull-Out-Sandwichprobekörpers des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4564 V-3-12 P	144
Abb. 207: Dimensionen des Shear-Sandwichprobekörpers des Typs 616 HC in Standardgröße mit Onserts des Typs CB4564 V-3-12 P mit Deckschichtverstärkung oben	144
Abb. 208: Dimensionen des Pull-Out-Sandwichprobekörpers des Typs 616 HC in vom DLR FA FLB vorgeschlagener Größe mit dem Onserttyp CB4002 V 3 CR 8	144
Abb. 209: Pull-Out-Sandwichprobekörper des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4002 V 3 CR 8	145
Abb. 210: Pull-Out-Sandwichprobekörper des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4002 V 3 CR 8 mit Deckschichtverstärkung oben	145
Abb. 211: Pull-Out-Sandwichprobekörper des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4564 V-3-12 P	145
Abb. 212: Pull-Out-Sandwichprobekörper des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4564 V-3-12 P mit Deckschichtverstärkung oben	145
Abb. 213: Pull-Out-Sandwichprobekörper des Typs 616 HC mit erhöhter Größe mit dem Onserttyp CB4002 V 3 CR 8	145
Abb. 214: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter transversaler Belastung (Pull-Out)	148
Abb. 215: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter flächenparalleler Belastung (Shear)	149
Abb. 216: Verriegelungsknebel in den Sandwichplattenstirnbereichen zur Fixierung von Containern und Kücheneinsätzen (45), (46)	150
Abb. 217: Konventionelle Ausführung von stirnseitigen Lasteinleitungspunkten in Sandwichpaneelen	150
Abb. 218: Handknebel an einem mit einem U-Profil stirnseitig verstärkten Sandwichpaneel	150
Abb. 219: CFK-Vierkanthohlprofil mit eingesetzten Nietmuttern als gewichtsparendes Anschraubsystem für die Verriegelungsknebel im Sandwichstirnbereich	151
Abb. 220: Arbeitsprinzip Nietmutter: Auffalzen eines Kragens beim Zusammenziehen der Nietmutter	151
Abb. 221: Lösungsansatz 1: Blind-Einniet-schrauben	151
Abb. 222: Lösungsansatz 2: Zementhohldübel	151
Abb. 223: Schadensbilder im CFK-Vierkantprofil: Risse entlang des Faserverlaufs durch Lochleibungskräfte beim Auffalzen des Nietkörpers	152
Abb. 224: CFK-Vierkanthohlprofile, hergestellt im Pull-Winding-Verfahren. Auf der Oberfläche sind Faserrovingbündel zu erkennen, die in 45°/135°-Richtung zur Profillängsrichtung verlaufen	152

Abb. 225: Schadensbild an einem CFK- Pull-Winding-Vierkanthohlprofil durch Vernietung; Riss entlang der Hauptfaserrichtung des Profils.	152
Abb. 226: CFK-Vierkanthohlprofile, hergestellt aus gewebten Faserhalbzeug der Fa. R&G GmbH.	153
Abb. 227: An mit einem handelsüblichen Metallbohrer gesetzten Bohrungen sind kein Einreißen oder Delaminationen erkennbar.	153
Abb. 228: Setzen von Nietmuttern mit Hilfe einer Nietzange.	153
Abb. 229: Nietprobekörper zeigen nur leichte Delaminationen im Bereich der Nietbohrungen.	153
Abb. 230: CFK-Monocoque eines Rennwagens, Positionen der Anschraubpunkte rot umkreist, (48).	155
Abb. 231: FE-Modell eines FKV-Massivkörpers als Lasteinleitungspunkt, (48).	155
Abb. 232: Skizze des Fertigungs- und Fügeablaufs des Randanbindungskonzepts.	155
Abb. 233: Prototyp des GFK-Trapezkörperkonzepts inkl. Mittenbohrung mit Gewindeverstärkungseinsatz zur Aufnahme der Anschlussschraube.	155
Abb. 234: GFK-Trapezkörper mit einer theoretisch als optimal errechneten Höhe drückt die Deckschichten stark auseinander.	157
Abb. 235: Nach Ausfräsen der Kernschicht auf den Deckschichtoberflächen innen verbleibende Kernwabenreste.	157
Abb. 236: In der Materialstärke auf 20 mm reduzierter GFK-Trapezkörper in der Randtasche des Sandwichtyps 618 HC.	157
Abb. 237: Sandwichtestprobekörper mit Randlasteinleitung zur Prüfung von Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 616 HC unter flächenparalleler Zugbelastung.	158
Abb. 238: Sandwichtestprobekörper zur Prüfung von Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 618 HC unter flächenparalleler Zugbelastung.	158
Abb. 239: CAD-Modelle der Sandwichprobekörper für die Untersuchung des „GFK-Klötzchen“-Randlasteinleitungskonzepts unter flächenparalleler Zug- sowie Schubbelastungen.	159
Abb. 240: Sandwichprobekörper mit Randlasteinleitung zur Prüfung von Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 616 HC unter flächenparalleler Schubbelastung.	159
Abb. 241: Sandwichprobekörper mit Randlasteinleitung zur Prüfung von Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 618 HC unter flächenparalleler Schubbelastung.	159
Abb. 242: Abmaße der Versuchsanordnung für Knebeltests an Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 618 HC, (39), Seite 9.1.	160
Abb. 243: Abmaße der Probenkörper für Knebeltests an Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 618 HC, Vorgabe durch Fa. SELL GmbH, (37), Seite 9.4.	160
Abb. 244: CAD-Modell eines Knebeltest-Sandwichprobekörpers mit integriertem „GFK-Klötzchen“.	160
Abb. 245: Zugeschnittene Glasfaser-Quadraxlagen zu einem Trockenfaserlagenpaket gelegt.	162
Abb. 246: Infusionsaufbau vor dem Auflegen der Vakuumfolien.	162
Abb. 247: Evakuierter Infusionsaufbau, fertig zur Injektion des Harzsystems.	162
Abb. 248: Injektionsvorgang des flüssigen Harzsystems.	163
Abb. 249: Mit Harzmatrix durchtränktes Lagenpaket.	163
Abb. 250: Entformung nach der Aushärtung bei Raumtemperatur.	164
Abb. 251: Tempern der GFK-Massivplatte bei 60°C für 16 h.	164
Abb. 252: Endkontrolle: Qualitäts- und Massenermittlung.	164
Abb. 253: Streifen zu 8 und 20 mm als Halbzeug für die Voll-GFK-Trapezkörper des Randprofilkonzepts.	164
Abb. 254: Führungsschablone zum winkligen, maßhaltigen Zusägen der Voll-GFK-Trapezkörper.	164

Abb. 255: CFK-Vierkanthohlprofile, eingelegt in Holzstützschablonen mit U-Nut als für das Zusägen.....	165
Abb. 256: Winklig zugesägte CFK-Vierkanthohlprofile 8 mm für die Verwendung im Sandwichtyp 616 HC	165
Abb. 257: Reparatursatz der Fa. Böllhoff, Gewindeeinsatzsystem HeliCoil.....	166
Abb. 258: Reparatursatz der Fa. BAER Vertriebs GmbH, Gewindeeinsatzsystem BaerCoil.	166
Abb. 259: Bohren des Grundlochs.....	166
Abb. 260: Gewindeschneiden mit den mitgelieferten Spezialgewindeschneidern.	166
Abb. 261: Einschrauben des Gewindeeinsatzes.....	166
Abb. 262: Zusammenbau der Insert-Sandwichprobekörper für Pull-Out-, Shear- und Knebeltests des aktuellen Randanbindungskonzepts (GFK-Klötzchen und CFK-Vierkanthohlprofile)	168
Abb. 263: Zusätzliche Arbeitsschritte zur Erstellung der Randanbindungstestkörper.....	168
Abb. 264: Fertigung der Probekörper für die Knebeltests am Randlasteinleitungskonzept.....	169
Abb. 265: Lokale Delamination der ersten Faserlage im GFK-Klötzchen im Bohrungsrandbereich.....	172
Abb. 266: Empfehlungen zur Vermeidung des Ablösens der ersten Faserschicht.	172
Abb. 267: Randeinflusskoeffizient unter Pull-Out- und Shearbelastung (24)	174
Abb. 268: Minimaler Abstand der Insertmittelpunkte zu den Einspannbacken sowie der Inserts.	174
Abb. 269: Beschriftungsschema der Insert-Sandwichtestkörper	174
Abb. 270: Schemata des Versuchsaufbaus sowie der Zug- und Schubtests (36), (55).....	177
Abb. 271: Aufbau für Tests an Inserts und Randlasteinleitungen unter transversaler Belastung (Pull-Out).	177
Abb. 272: Aufbau für Tests an Inserts und Randlasteinleitungen unter flächenparalleler Belastung (Shear).	178
Abb. 273: Knebeltests an Randlasteinleitungen mit Testrig der Fa. SELL GmbH.	178
Abb. 274: Statistische Analyse der Erstversagenslastwerte der Inserttests nach FA. SELL GmbH, (35), (36), (39).	180
Abb. 275: Einzelkomponenten einer Insertverbindung, deren Massen in die Berechnung der Verbindungsgüten eingehen (gewichtsrelevante Elemente sind rot eingefärbt).	181
Abb. 276: Schnittdemonstrator eines Topfinsets aus dem Kunststoff ULTEM 9085 im Sandwichtyp 616 HC, mit GFK-Klötzchen-Randprofilkonzept zu einer T-Stoßverbindung aufgebaut.....	185
Abb. 277: Detailansicht	185
Abb. 278: Schnittdemonstrator eines Schraubinserts aus Aluminium im Sandwichtyp 618 HC mit angeschraubtem CFK-L-Profil als Beispiel für eine lokale Krafteinleitung.....	185
Abb. 279: Detailansicht, Gewinde zwischen den Inserthalbkörpern durch Strichlinie gekennzeichnet	185
Abb. 280: Demonstratorgalley der Fa. SELL GmbH.	186
Abb. 281: Topfinsets zur Befestigung von demontierbaren Zwischenböden.	186
Abb. 282: Schraubinserts zur Befestigung der Lagerböcke der Demonstratorgalley.....	186
Abb. 283: Onsert zur Befestigung der Erdungsverkabelung.....	186

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Widerstandswerte verschiedener Niet Typen	32
Tab. 2: Berechneter Widerstand für die Referenz Probe [SELL]	33
Tab. 3: Messergebnisse der Coupon Bonding Probe	33
Tab. 4 Ergebnisse des Ausreißversuches	35
Tab. 5 Ergebnisse Trommelschälversuch	38
Tab. 6: Typische Gestaltungsweisen lokaler Lasteinleitungen in der Fläche von Sandwichelementen (2), (7).....	61
Tab. 7: Kategorisierung von Inserttypen abhängig von der Ausdehnung im Sandwichkern.....	64
Tab. 8: Kategorisierung von durchgehenden Inserts nach der Ausdehnung des Pottings sowie der Existenz von Deckschichtkragen.....	64
Tab. 9: Mechanische Eigenschaften des Deckschichtprepregs PF 808-G220-50, (22).....	71
Tab. 10: Mechanische Eigenschaften (Mittelwerte) des Kernwabenhalbzeugs Coremaster N636-3,2-48 (23).....	72
Tab. 11: Mechanische Eigenschaften der Sandwichtypen 616 HC und 618 HC der Fa. Schütz GmbH & Co. KGaA, (21).....	73
Tab. 12: Liste der für das Projekt zur Verfügung stehenden zölligen Schraubendurchmesser (Vorgabe Fa. SELL GmbH).....	74
Tab. 13: Mechanische Kennwerte des im Rapid-Prototyping-Verfahren FDM verarbeiteten Kunststoffs ULTEM 9085 (PEI), (34).....	79
Tab. 14: Im Projekt InGa untersuchte und getestete Inserttypen (Schraub- und Topfinert CRES wurden nicht getestet).....	80
Tab. 15: Beispiele für 1993 von der Fa. SELL GmbH getestete Insertverbindungen (35), (38). 81	
Tab. 16: Verbindungsgüte der Topfinerts unter transversaler (Pull-Out) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte. Schraube NAS 514-40, ca. 4,83 mm Schaftdurchmesser).....	99
Tab. 17: Verbindungsgüte der Topfinerts unter flächenparalleler (Shear) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte. Schraube NAS 517-4-11 1/4"-28, (ca. 6,35 mm Schaftdurchmesser).....	99
Tab. 18: Verbindungsgüte der Schraubinserts unter transversaler (Pull-Out) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.	112
Tab. 19: Verbindungsgüte der Schraubinserts unter flächenparalleler (Shear) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.....	113
Tab. 20: Drehmomente der Schrauben für die Sheartests der integrierten Inserts.....	135
Tab. 21: Integrierte Insertkonzepte unter transversaler (Pull-Out) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.	137
Tab. 22: Integrierte Insertkonzepte unter flächenparalleler (Shear) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte. Schraube.	138
Tab. 23: Verbindungsgüte der Onserts unter transversaler (Pull-Out) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.	147
Tab. 24: Verbindungsgüte der Onserts unter flächenparalleler (Shear) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.	147
Tab. 25: Alternativkonzepte zum Einnietmutter-FK-Vierkanthohlprofilkonzept.	154
Tab. 26: Spezifikation der CFK-Vierkanthohlprofile.	156
Tab. 27: Spezifikation des für die GFK-Trapezkörper verwendeten Faserhalbzeugs.....	161
Tab. 28: Spezifikation der Matrix der Fa. Sicomin Epoxy Systems, Harz SR 1700i und Härter SD 8822, (49).....	162
Tab. 29: Mechanische Eigenschaften der Matrix der Fa. Sicomin Epoxy Systems, Harz SR 1700i und Härter SD 8822, (49).....	163
Tab. 30: Übersicht über am Markt erhältliche Gewindeverstärkungen.....	165

Tab. 31: Verbindungsgüte des Randlasteinleitungskonzepts unter transversaler (Pull-Out) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.	171
Tab. 32: Verbindungsgüte des Randlasteinleitungskonzepts unter flächenparalleler (Shear) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.	171
Tab. 33: Verbindungsgüte des Randlasteinleitungskonzepts, Knebeltests, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.....	172
Tab. 34: Dimensionen der Insert-Sandwichprobekörper für Tests unter transversaler Belastung (Pull-Out).	175
Tab. 35: Dimensionen der Insert-Sandwichprobekörper für flächenparallele Belastung (Shear) sowie Knebeltests.	176
Tab. 36: Variablenverzeichnis für Verbindungsgüteformeln	183
Tab. 37: Variablenverzeichnis für Verbindungsgüteformeln	184

Abkürzungen

HC-Panel	Honey Comb Panel
LuFo	Luftfahrtforschungsprogramm
ZCC	Zodiac Cabin Controls
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
LED	Leuchtdiode
OLED	Organische Leuchtdiode
SMD	Surface-mounted device
TPAL	Top Panel Accent Light
WP	Work Package
AP	Arbeitspaket (Sub Work Package)
OEM	Original Equipment Manufacturer

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

1.1.1 Verbundprojekt Innovative Galley

Ziel des Verbundprojekts InGa ist es, Innovationspotenziale von Galleys und Galley Inserts zu identifizieren und zu realisieren.

Das LuFo IV-IV Verbundprojekt wurde gemeinschaftlich mit folgenden Partnern durchgeführt:

- Sell GmbH
- Zodiac Cabin Controls (ZCC)
- Fraunhofer PYCO
- Alphaboard

Für Galleys der nächsten Generation sollten Technologien und Innovationen entwickelt werden, um die Bereiche Fertigung, Betrieb und Customization nachhaltig zu verbessern. Es wurde angestrebt Materialien und Bauweisen zu entwickeln, die eine Gewichtsreduktion ermöglichen und so zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs bzw. der Betriebskosten führen. Modulare Bauweisen, Generierung von Standard-Teilen sowie Baugruppen und innovative Installationskonzepte (z.B. Erdungskonzepte) sollten zur Senkung der Fertigungskosten führen. Integrierte Einbaugeräte und Lichtsysteme sowie elektronische Schlösser sollen die Effizienz und den Komfort des Arbeitsplatzes Galley erhöhen. Es wurde ein Konzept zur Vernetzung und zentralen Steuerung der Galleys, mit dem Ziel deren Energiebedarf zu verringern und die Wartung zu vereinfachen, erarbeitet. Dies schloss die Integration in ein Kabinenmanagementsystem ein. Das Vorhaben sollte dazu beitragen, der deutschen Luftfahrtzuliefererindustrie ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Die spätere industrielle Fertigung soll Arbeitsplätze an deutschen Standorten stärken.

1.1.2 Teilprojekt des DLR

Das Ziel des DLR Teilprojekts war die Entwicklung von Lösungen zur strukturellen Integration von Funktionselementen insbesondere für die elektrische Erdung, Beleuchtungs- und Designapplikation in Flugzeuggalleys. Des Weiteren sollten durch ein neues Paneldesign und neue Verbindungspunkte die strukturell tragenden Bauteile verbessert werden, um somit das Komponentengewicht zu reduzieren. Durch die Integration der Funktionselemente in lasttragende Strukturen sollte das Gesamtgewicht reduziert werden, damit auf umlaufende Versteifungen, Aussparungen oder Halterungen verzichtet werden kann. Durch die Integration sollte eine Steigerung der Robustheit und somit der Lebensdauer möglich werden. Neben den reinen funktionellen Aspekten sollten neue Designanwendungen ermöglicht werden. Durch intelligente Lösungen zur integrierten elektrischen Erdung sollte die Komplexität einer individuellen Erdung von Einzelteilen reduziert werden. Zu integrierende Funktionen waren LED-Beleuchtungselemente und OLED-Leuchtmittel. Alle Arbeiten erfolgten in enger partnerschaftlicher Zusammenarbeit mit Fa. Sell und Fa. ZCC. Das DLR bearbeitete die Integration von LED Leuchtmitteln im Rahmen eines Unterauftrags der Fa. ZCC. Die Ergebnisse sind hier im Bericht dargestellt.

Die Hauptaufgaben des DLR Teilprojekts sind im Folgenden gelistet:

Gewichtsreduzierte Panels

- Untersuchung der Lasteinleitung in Sandwichstrukturen und Ableitung von Verbesserungskonzepten

- Entwicklung verbesserter Sandwichinserts zur einfacheren Montage, Leistungssteigerung oder Kosteneinsparung
- Herstellung von Musterbauteilen und Prüfkörpern
- Integration von Mustern in den Gesamtdemonstrator

Bauteilerdung

- Entwicklung einer vereinfachten, integrierten Bauteilerdung für Galleyinserts
- Entwicklung der Kontaktierung einer integrierten Bauteilerdung
- Herstellung von Demonstratorbauteilen
- Integration der neuen Bauteilerdung in den Gesamtdemonstrator

Integrierte Lichtsysteme

- Identifikation von Anwendungen für die Integration von Beleuchtungselementen in Galleypanels
- Entwicklung und Bewertung von Konzepten zur Integration
- Auswahl geeigneter Leuchtmittel (LED, OLED)
- Herstellung von Demonstratorbauteilen
- Integration von Beleuchtungselementen in den Gesamtdemonstrator

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Gewichtsreduzierte Panels

Galleystrukturen werden vor allem aus sehr leichten HC-Panels mit Wabenkern und Kunststoffdeckhäuten sowie Aluminium Fräs- und Profilteilen gebaut. An den Hardpoints am Boden und der Decke, wo die Galley mit der Flugzeugstruktur verbunden ist, wird die Belastung über Inserts in die Struktur geleitet. Diese Punkte und deren Test sind maßgeblich für den Strukturtest der Gesamtkomponente, da für diese Punkte kritische Lasten und Beschleunigungen seitens der Zulassungsvorschriften und des OEMs vorgegeben sind. Die Struktur besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Einem Unter- und einem Oberschrank. Die Flächenbauteile bestehen aus gefrästem Sandwichplattenmaterial mit Honigwabenkern (HC) und zwei Decklagen aus Aramid- oder Glasfaserverstärktem Kunststoff. Waagerechte und senkrechte Panels werden teils direkt miteinander verklebt, teils werden Panels an den Rändern mit Aluminiumprofilen eingefasst und verklebt, um den Wabenkern vor Feuchte und Schädigung zu schützen. Zur Lasteinleitung werden Aluminiumfrästeile und Aluminiumprofile benutzt. Dabei werden die Profile mit den HC-Panels verklebt und anschließend verschraubt. Hierfür müssen an den entsprechenden Stellen im HC-Material Einsätze (Inserts) vorgesehen werden. Neben den Hardpoints am Boden müssen natürlich die galleyinternen Verbindungspunkte den Belastungen standhalten. Da jedoch das Gesamtsystem nur einem Test unterzogen wird, d.h. die zugrunde gelegten kritischen Bruchlastkollektive aufgebracht werden, ist für die spezifischen Punkte unbekannt, ob diese noch freie Sicherheitsmargen haben, welche gewichtsreduzierend genutzt werden können. Um diese lokalen Festigkeiten der Einzelverbindungen zu bestimmen, sind experimentelle Untersuchungen notwendig. Basierend auf diesen Werten können Designverbesserungen erarbeitet werden.

Bauteilerdung

In einer Flugzeuggalley muss jedes Strukturbauteil an die elektrische Erdung der Galley angeschlossen werden, damit sich die Einzelteile nicht statisch aufladen können. Im Falle einer Aufladung könnte der Strom über den Menschen abfließen und diesen verletzen. Häufig ist jedoch der Haupttreiber der Erdung der Schutz elektronischer Komponenten, welche durch die Spannungsspitze der Entladung geschädigt werden können. Insbesondere Kunststoffbauteile laden sich aufgrund der niedrigen Leitfähigkeiten sehr schnell statisch auf. Diese niedrige

Leitfähigkeit sorgt des Weiteren dafür, dass ein einfacher Oberflächenkontakt, z.B. im Falle einer Verschraubung, zwischen metallischen Rahmen und Verbundpanel nicht zu einer Erdung der Struktur führt. Da in vielen Fällen der Rahmen mit dem Panel verklebt wird, wirkt der Klebstoff zusätzlich noch als elektrischer Isolator. Die gängige eingesetzte technische Lösung ist das separate Kontaktieren des Panels mittels verschraubten oder vernietetem Erdungskabel. Hierdurch erfolgt der elektrische Kontakt und gleichzeitig eine galvanische Trennung, welches z.B. bei einer Erdung eines Kohlenstofffaserverbunds notwendig ist, um eine Kontaktkorrosion des angebotenen Metalls zu verhindern. In einer Galley werden jedoch fast ausschließlich Aramid- und Glasfaserverstärkte Kunststoffe eingesetzt, so dass der Aspekt einer galvanischen Trennung zu vernachlässigen ist. Derzeitig müssen alle flächigen Komponenten über 400 cm^2 geerdet werden. Die Erdungskabel führen zu Verteilerblöcken, welche mit der Flugzeugmasse verbunden sind. Die Erdungskabel werden in regelmäßigen Abständen mit Schellen und Schrauben an der Galleystruktur befestigt. Teilweise werden die Kabel mit Wellschläuchen zusammengefasst oder mit Aluminiumverkleidungen abgedeckt. Zum Verlegen der Kabel sind Durchbrüche und Montageöffnungen notwendig, welche die Struktur schwächen.

Integrierte Lichtsysteme

Licht ist eine essenzielle, funktionelle und wichtige Designkomponente einer Flugzeuggalley. Einerseits muss die Beleuchtung bei den Arbeitsprozessen optimale Umgebungsbedingungen für die Crew bieten, andererseits ist das Lichtdesign ein Markenzeichen. Eine Galley ist vor allem eine raue Arbeitsumgebung für die Beleuchtung. So können Beleuchtungselemente mit verschiedenen korrodierenden Medien in Kontakt kommen (Alkohol, Säuren, Salze). Des Weiteren sind Stoßbelastungen möglich, z.B. durch nicht gesicherte Gegenstände. Die hohe räumliche Dichte für Galleyinserts und Stauräume erfordert kleine Bauräume für die Lichtsysteme. Bereits in den klassischen Haushaltsanwendungen ersetzen LEDs konventionelle Lichtsysteme aufgrund ihres niedrigen Stromverbrauchs und ihrer hohen Lebensdauer. Die Lebensdauer einer LED ist so hoch, dass sie mittlerweile ein ganzes Flugzeugleben halten kann ohne ausgetauscht zu werden. Der benötigte Bauraum von LEDs mit gleicher Lichtleistung wie ein konventionelles Beleuchtungsmittel ist viel geringer. Sogenannte SMD-LEDs werden mittlerweile hoch automatisiert gefertigt und auf flexiblen Leitungsbändern als Halbzeug angeboten. Diese LED-Bänder sind sehr flach und können sogar in gekrümmte Strukturen integriert werden. Des Weiteren sind flächige organische Leuchtdioden (OLEDs) mittlerweile kommerziell verfügbar. Trotz bekannter Schwächen wie z.B. einer begrenzten Lebensdauer von ca. 5000h (bei 1000 cd/m^2) und einer abfallenden Helligkeit über die Lebenszeit bieten OLEDs. Insbesondere Medien, Temperatur und Sauerstoff führen zu einer Degradation der Leuchtmittel. OLEDs zeichnen sich durch eine hohe Farbtreue sowie einen sehr hohen Kontrast und einen geringen Stromverbrauch. Das flächige, gleichmäßige Licht macht die OLED für zahlreiche Designanwendungen, aber auch für Funktionsbeleuchtung interessant. Das flächige Licht verhindert Schattenwurf und macht den Einsatz weiterer Lichtquellen überflüssig. Mittlerweile existieren OLED Leuchtmittel, welche flexibel sind und auch auf gekrümmten Strukturen eingesetzt werden können.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur strukturierten Bearbeitung wurden die Arbeiten in drei Arbeitspakete strukturiert, welche sich in den Arbeitsplan des Verbundprojekts integrieren.

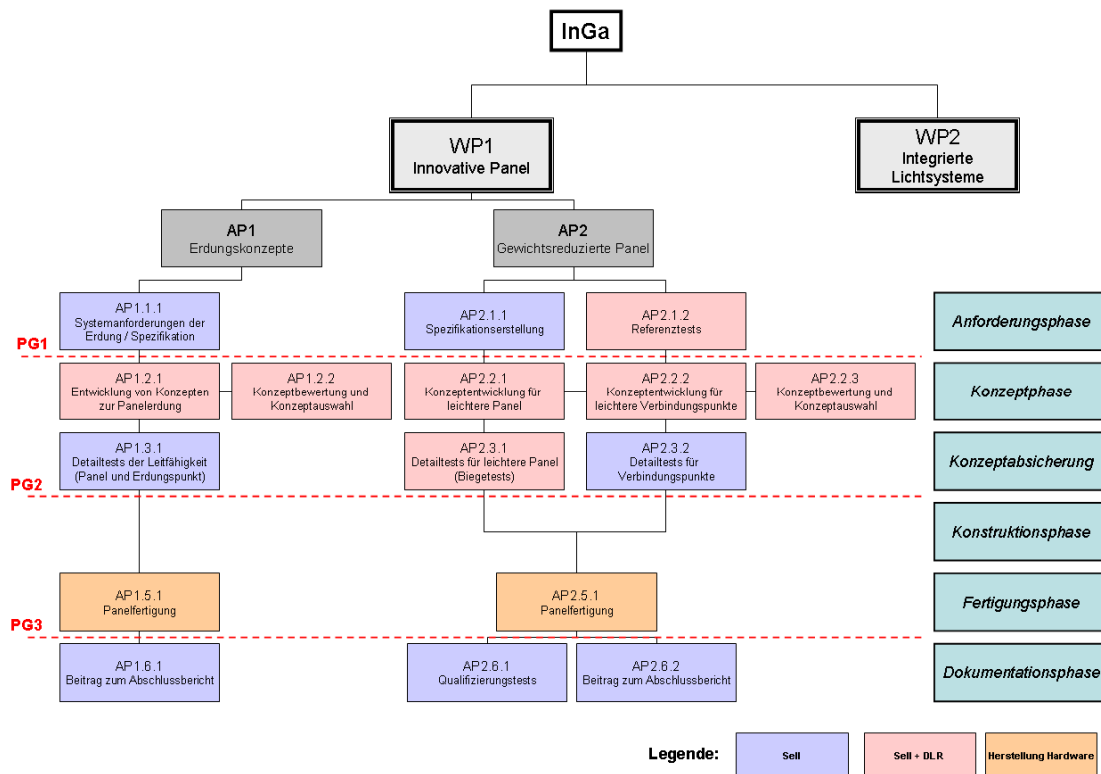


Abb. 1: Arbeitspaketstruktur WP1 - Innovative Panel

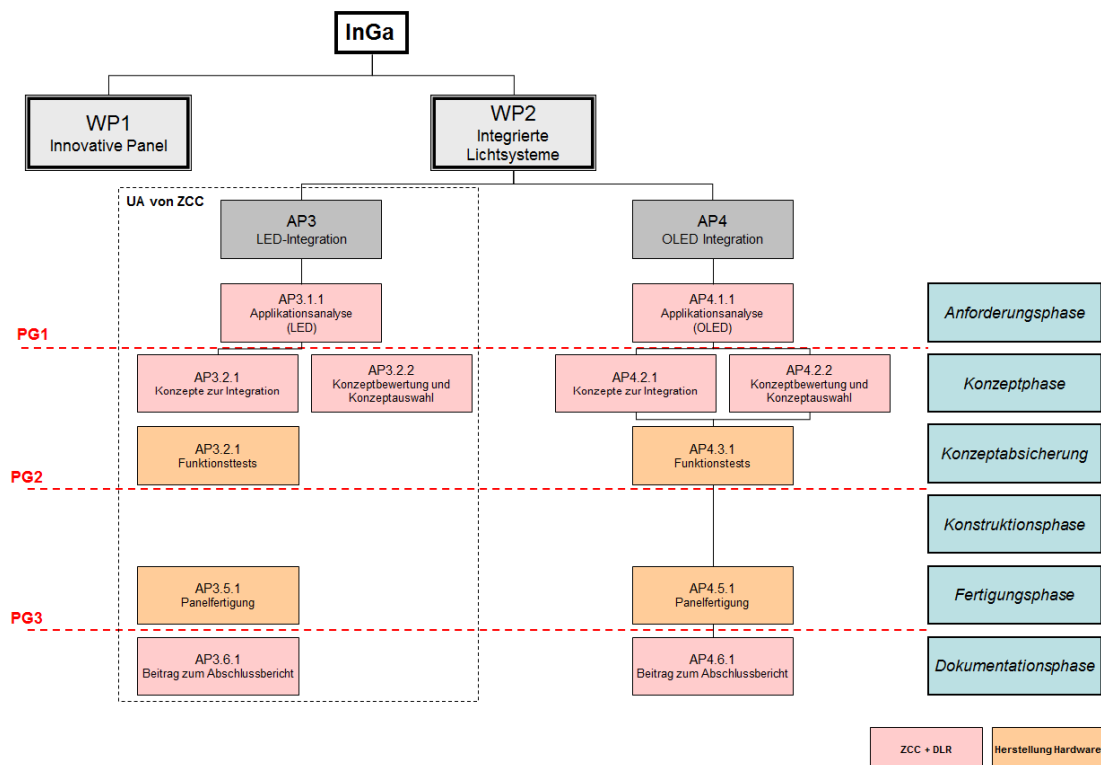


Abb. 2: Arbeitspaketstruktur WP2 - Integrierte Lichtsysteme

1.3.1 AP1 – Erdungskonzepte

Das Arbeitspaket wurde partnerschaftlich vom DLR und der Fa. Sell durchgeführt. Die Ermittlung etwaiger Randbedingungen und relevanter Spezifikationen erfolgte im AP1.1.1. bei der Fa. Sell. Aufbauend auf diesen Spezifikationen entwickelte das DLR Konzepte zur Erdung von Galleyinserts, z.B. Wasserkocher, Kaffeemaschinen, Öfen und der Erdung von Strukturteilen. Im Rahmen der Konzeptfindungsphase in AP1..2.1 wurden drei verschiedene Konzepte identifiziert und geprüft. Die Integration von Kupferfolie, Kupfermesh und Plasmabeschichtung. Nach Abstimmung und Bewertung mit der FA Sell in AP1.2.2. wurde die Integration von Kupfermesh als Flächenleiter weiterverfolgt. In AP1.3.1 wurde das Konzept weiterausgearbeitet. Arbeitsschwerpunkt bildete eine industrietaugliche Kontaktierung des integrierten Flächenleiters. Da die Veränderung des Herstellprozesses des HC Panels durch die Integration von Kupfermesh einen erheblichen Eingriff in die Zulieferer- und Zulassungskette darstellt, wurde in AP1.5.1. die Zusammenarbeit mit der Fa. Schütz gesucht. In enger Kooperation von Schütz und DLR konnten unter Serienbedingungen mehrere HC Panels mit integriertem Kupfermesh hergestellt werden, so dass direkt ein Zulieferer für eine Serienumsetzung gefunden wurde. Das Erdungskonzept wurde auf ebenen und gekrümmten Probeteilen demonstriert und mit dem entwickelten Kontaktierungskonzept in der Demonstratorgalley verbaut. Das Erdungskonzept spart der Fa. Sell nicht nur Gewicht, sondern auch Montagekosten, Montagezeiten sowie Lagerhaltungskosten. Es ermöglicht darüber hinaus eine erheblich flexiblere, bauraumreduzierte Erdung der Galleyinserts, da diese nun überall auf der Galleyrückwand geerdet werden können. Das Konzept wurde in einem externen Labor auf den Fehlerstromfall von 60A erfolgreich getestet.

1.3.2 AP2 - Gewichtsreduzierte Panel

Das Arbeitspaket wurde gemeinschaftlich mit der Fa. Sell bearbeitet. Um eine Weiterentwicklung gegenüber dem Stand der Technik entwickeln zu können, wurden zunächst im AP2.1.2 Referenztests an vorhandenen Standardinserts der Fa. Sell durchgeführt. Dies ermöglichte es bestehende Inserts hinsichtlich ihrer mechanischen Leistungsfähigkeit vergleichen zu können. Hierbei wurden die Tests u.a. bei der Fa. Sell durchgeführt und beim DLR ausgewertet. In den Arbeitspaketen AP2.2.1, AP2.2.2 und AP2.2.3 wurden gemeinschaftlich mit Sell Strukturkonzepte entwickelt, welche eine Gewichtseinsparung ermöglichen sollten. Leider erwies sich hierbei, dass insbesondere eine Optimierung des HC Panels kaum realisierbar ist und vielen, nicht veränderbaren Randbedingungen unterliegt. Daher wurde in Abstimmung mit dem Verbundführer als Schwerpunkt die Entwicklung verbesserter Sandwichinserts gesetzt. In AP2.2.1. und AP2.3.1 wurde sich auf eine Ermittlung der Referenzdaten durch Biegetests und der Verbesserung der Randlasteinleitung beschränkt. In AP2.2.2 entwickelte des DLR neue, leistungsfähigere Insertgeometrien und untersuchte ausführlich kommerziell erhältliche, bei der Fa. Sell aber bis dato nicht eingesetzte Inserts und Onserts. Im AP2.2.3 erfolgten zusammen mit Sell eine Bewertung anhand der Verbindungsgüte der Inserts und eine Auswahl für den Galleydemonstrator. Diese wurden teilweise direkt in AP2.5.1 im Demonstrator umgesetzt oder in Form von Handdemonstratoren der Galley beigelegt.

1.3.3 AP3 – LED Integration (UA ZCC)

Das Arbeitspaket AP3 - LED Integration wurde gemeinschaftlich im Unterauftrag der Fa. ZCC Zodiac Cabin Controls bearbeitet. Im AP3.1.1 wurde zusammen mit der Fa. ZCC eine Applikationsanalyse der Lichtsysteme durchgeführt und die relevanten Randbedingungen und Spezifikationen ermittelt. Die ursprüngliche Planung sah vor, Lichtsystem vollständig in die Decklagen von HC Panels zu integrieren. Diese Konzepte konnten leider aufgrund strikter Austausch- und Aufwertungsanforderungen durch die Industrie nicht weiter verfolgt werden. Anstelle dessen wurden bauraumminimale Beleuchtungen untersucht. In AP3.2.1 wurden

Konzepte für Spotlights, das Area Work Light sowie das Top Panel Accent Light erarbeitet. Die Arbeitsteilung erfolgte in dem Maße, dass das DLR die Fertigung der Strukturteile und die Integration übernahm, ZCC die elektronische und elektrische Entwicklung vorantrieb. Seitens des DLR wurde insbesondere auf eine Faserverbundgerechte Integration der Beleuchtung geachtet. In AP3.3.1. wurden die Konzepte konstruiert und in mehrere Iterationen verbessert. In AP3.5.1 wurden die Beleuchtungsmittel von ZCC in die Strukturteile für den Gesamtdemonstrator integriert.

1.3.4 AP4 – OLED Integration

Das Arbeitspaket AP4 - OLED Integration wurde gemeinschaftlich mit der Fa. ZCC Zodiac Cabin Controls bearbeitet. Im AP4.1.1 wurde zusammen mit der Fa. ZCC eine Applikationsanalyse der Lichtsysteme durchgeführt und die relevanten Randbedingungen und Spezifikationen ermittelt. Anhand dieser Applikationsanalyse wurde das Area Work Light ermittelt. In AP4.2.1 wurden Konzepte zur Integration erarbeitet und seitens ZCC in AP4.2.2 bewertet. Diese sahen, vergleichbar zur LED Beleuchtung, einen Einschub in den Wabenkern des HC Panels vor. Dies gewährleistete eine Austauschbarkeit. In AP4.3.1 wurden Funktionstests mit gefertigten oder integrierten OLED Leuchten durchgeführt. Die OLED Leuchtmittel wurden anfangs für die Funktionstests über das DLR beschafft. Die OLEDs für den Demonstrator wurden in AP4.5.1 über die Zuliefererkette von ZCC angeschafft. Im Arbeitspaket wurden die Leuchtmittel in den Demonstrator integriert und etwaige benötigte HC-Panels gefertigt.

1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

Das DLR Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik verfügt über eine erhebliche Expertise hinsichtlich der vollständigen Prozesskette von Faserverbundwerkstoffen. Insbesondere in der Zusammenarbeit mit allen Konzernteilen von Airbus trägt das Institut zum Wissensgewinn sowie zum Kompetenztransfer bei. Im Rahmen verschiedener Projekte bearbeitete das Institut die Thematik der Funktionsintegration schon längerfristig. So wurden in internen Projekten bereits erfolgreich Antennen integriert, welche einen erheblichen Gewichtsvorteil sowie verringerte Montagekosten erzielen konnten. Des Weiteren wurde eine Integrationslösung für eine elektrische Flügelenteisung entwickelt und realisiert. In Raumfahrt- und Verkehrsprojekten wurden Faserverbundkonstruktionen aus HC- und Schaumsandwich entwickelt, realisiert und zum Einsatz gebracht. Der technische Stand zum Vorhaben wurde in Fachgesprächen mit den beteiligten Partnern ermittelt und durch Recherchen in der gängigen Fachliteratur ergänzt.

Eine Patenrecherche zu den Themenbereichen Bauteilerdung, Sandwichinserts sowie strukturintegrierte Beleuchtungen erbrachten keine Schutzrechte, die einer späteren Verwendung entgegenstehen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit arbeitete das DLR eng mit den Partnern Sell und ZCC zusammen. Um eine synergetische Bearbeitung zu erreichen, wurden zahlreiche Abstimmungsgespräche auch zwischen den geplanten regulären Treffen durchgeführt. Während der Bearbeitung der Bauteilerdung kamen die Fa. Sell und das DLR zu der Entscheidung, dass eine Bearbeitung des Themas nur unter Mitwirken der Fa. Schütz sinnvoll ist. Die Fa. Sell stellte daraufhin den Kontakt mit Schütz her. Diese unterstützen unentgeltlich durch Bereitstellung von Beratungsleistungen sowie Fertigungszeit im Technikum als auch die Bereitstellung von Materialien.

2 Eingehende Darstellung: AP1 – Erdungskonzepte

2.1 Konzeptfindungsphase

Zunächst musste festgestellt werden, wie das aktuelle Erdungskonzept bei bestehenden Galley Strukturen aussieht und welche Übergangswiderstände an den Verbindungsstellen auftreten. Weiterhin musste geklärt werden, welche Anforderungen an die Erdung in Bezug auf den Gesamtwiderstand und die Schadenstoleranz gestellt werden.

Die Firma SELL hat die Anforderungen zusammengestellt und dem DLR verfügbar gemacht. Aus der OEM Anforderung EDR-9200M1F0380 00 leitet sich die Vorgabe ab, dass von jedem beliebigen Messpunkt aus, bis zum Haupterdungspunkt am Flugzeug nicht mehr als 10 mΩ gemessen werden dürfen. Weiterhin muss ein Erdungsweg redundant aufgebaut sein und ein versehentliches durchtrennen der Erdungskabel darf nicht zu einem Fehler im gesamten System führen.

Eine Analyse der bestehenden Verkabelung zeigt, dass die Erdungskabel nachträglich mit Abstandshaltern auf die Struktur aufgebracht werden. Die Halteelemente müssen in einem vorgegebenen Abstand von 200 mm mithilfe eines zusätzlichen Inserts an der Sandwichstruktur befestigt werden. Abb. 3 zeigt einen exemplarischen Aufbau dieses Schutzleiters. Die Halteelemente sind in der Abbildung rot markiert.

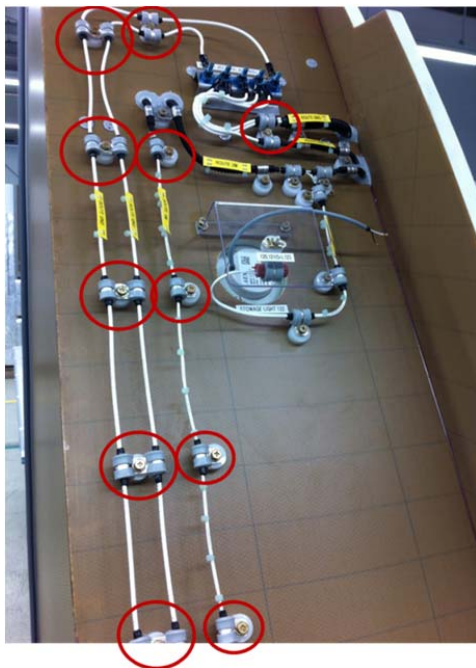


Abb. 3: Herkömmliche Verkabelung auf einer Galley Rückwand



Abb. 4: Benötigte Zusatzelemente

Für jedes dieser Elemente muss ein Loch für ein Insert gebohrt werden, das Insert mithilfe von Klebstoff eingeklebt werden und anschließend das Halteelement mit dem Insert verschraubt werden. Anschließend wird das Kabel inklusive eines Scheuerschutzes an dem Element befestigt. Ein Halteelement wie es in Abb. 4 oben dargestellt ist wiegt 14,3 g. Hinzu kommt noch das Gewicht des Inserts und des Klebstoffes.

In jedem Aufbau sind in auch eine gewisse Anzahl an Verteilerknoten notwendig. Ein Beispiel für einen Verteilerknoten, ein sogenanntes Bracket, ist in Abb. 4 unten dargestellt. Dieses Element wiegt ca. 122 g. Auf das Gewicht der Kabel, der Isolierung, der Kabelschuhe und Scheuerschutzeinrichtungen wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Eine genaue Gewichtsauflösung der Brackets, Kabel und Supportmaterialien liegt der Firma SELL vor.

Zusätzlich zu dem eingebrachten Gewicht. kommt auch ein nicht unerheblicher Montageaufwand. Die Mitarbeiter der Firma SELL schätzen den Montage- und Verkabelungsaufwand der Rückwand auf drei Fertigungsschichten, welche mit 8 Stunden angesetzt sind.

Als Ziel des Projektes haben sich eine Gewichtsreduzierung und eine Reduzierung des Montageaufwandes herauskristallisiert.

In der Startphase des Projektes wurden drei Konzepte vom DLR identifiziert und unterschiedlich tief untersucht:

1. Integrierte oder nachträglich aufgeklebte Kupferfolien
2. Plasmabeschichtung mittels kalt abgeschiedenen Kupfer (Atmosphärendruckplasma)
3. Flächig integriertes Kupfergewebe in der Oberfläche eines Galleypanels (Alternativ Bronze oder Aluminium)

2.1.1 Kupfer-Folie

Ein erstes Konzept sah vor, Eine selbstklebende Kupferfolie auf das Honeycomp Sandwich zu applizieren und die Erdung über diese Fläche zu realisieren.

Die Kupferklebefolie ist in verschiedenen Ausführungen erhältlich. Variiert werden kann an dieser Stelle sowohl die Breite und die Länge, als auch die Dicke der Kupferschicht. Die Dicke einer solchen Kupferklebefolie liegt sinnvollerweise zwischen 0,025 mm und 0,038 mm. Bei diesen Stärken treten keine erwähnenswerten strukturelle Beeinflussung des Panels auf.

In Versuchen hat sich gezeigt, dass sich die Folie sowohl während des Fertigungsprozesses direkt in die Struktur integrieren lässt, als auch nachträglich von außen auf die Panels appliziert werden kann.

Bei der zuerst genannten Möglichkeit lässt sich die Folie durch die verwendete Faserverbunddeckschicht gegen die Umgebung elektrisch isolieren. Allerdings muss das Panel zur Kontaktierung punktuell mechanisch nachbearbeitet werden, um die Kontaktstelle frei zu legen.

Weiterhin besteht das Problem, das die Folie einen erheblichen mechanischen Einfluss auf die Festigkeit des Panels hat, da dies wie eine Trennstelle zwischen Kern und Deckschicht wirkt.



Abb. 5: Selbstklebende Kupferfolie

2.1.2 Plasmabeschichten

Mithilfe des Atmosphärendruckplasmas ist es möglich, sowohl flächige, leitfähige Oberflächen als auch definierte Leiterbahnen zur Signalübertragung zu realisieren. Laut Hersteller können mithilfe dieser Technologie bis zu 6000W Leistung übertragen werden.

Das Kupfer wird mit Hilfe einer Portalanlage auf das Trägermaterial aufgebracht. Somit ist ein vielseitiger Einsatz dieser Technologie denkbar.

Mit Fa. Reinhausen -Plasma konnte eine Firma identifiziert werden, bei der Vorversuche im kleinen Maßstab durchgeführt werden können, um das Konzept zu validieren. Hier können unter Anleitung eines erfahrenen Ingenieurs eigene Versuche direkt auf dem originalen Panel durchgeführt werden.

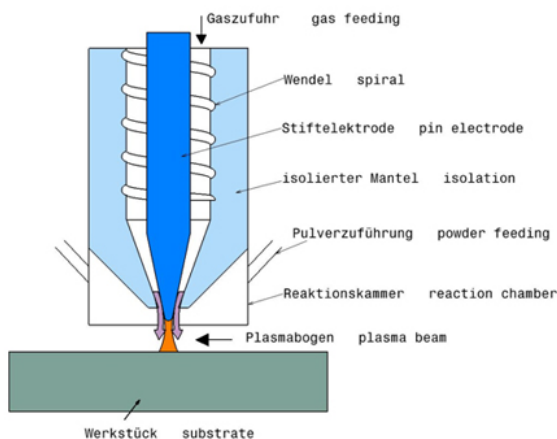


Abb. 6: Funktionsprinzip Atmosphärendruckplasmas (Quelle: Reinhausen Plasma)

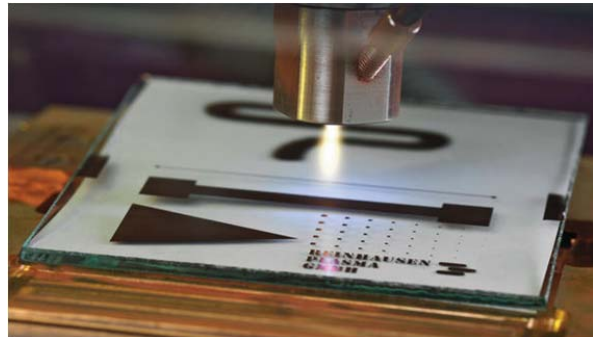


Abb. 7: Geometriefreiräume bei der Plasmabeschichtung

Um die Leitfähigkeit der Bahnen zu prüfen, wurden Glasfaserpanels und Kohlestofffaserpanels zu der Firma Reinhausen Plasma geschickt. Hier wurde mit einem sogenannten kalten Plasma, welches unter Atmosphären Druck mit ca. 400°C (in der Düse) Metallpartikel auf die Panels aufträgt, Leiterbahnen auf die Panels gedruckt. Als Metalle sind aufgrund ihrer Leitfähigkeit Silber und Kupfer verwendet worden.

Abb. 8 zeigt die Plasmabeschichtung welche mithilfe einer CNC-Anlage durchgeführt wurde. Zu sehen ist das fest eingespannte Panel mit bereits 12 aufgetragenen Kupferschichten, sowie den beweglichen Roboterarm mit der Plasmadüse. Der Roboter verfährt, je nach Einstellung, mit einer Geschwindigkeit zwischen 100 und 1000 mm/sec über das Panel. Für Schichtdicken bis 160 µm verfährt die Anlage bis zu 30 Mal über eine Bahn. Hierbei werden ca. 3g Kupfer, beziehungsweise Silber pro Minute abgeschieden.

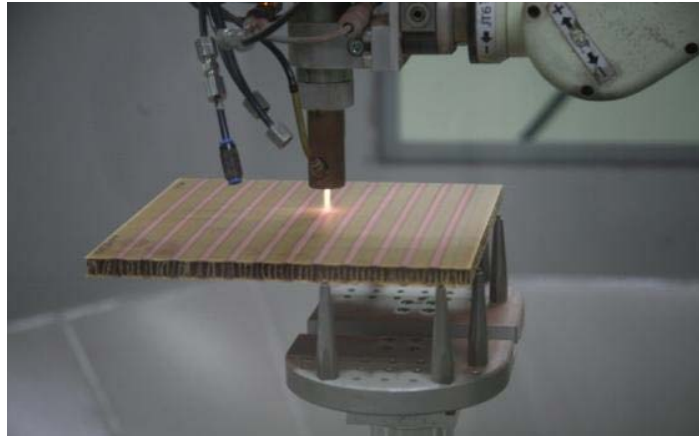


Abb. 8: Leiterbahnbeschichtung auf einem Panel

Die CFK-Panels sind der Firma Reinhausen mit zwei verschiedenen Oberflächen zur Verfügung gestellt worden. Die Abreisgewebeoberfläche weist eine sehr raue Oberfläche auf, während die werkzeugseitige Oberfläche sehr glatt ist.

Die ersten Versuche haben ergeben, dass das Kupfer auf der glatten CFK Seite nicht gehalten hat. Aus diesem Grund ist zuerst eine Aluminium Schicht aufgetragen worden. Auf diese Aluminium-Bahnen konnte dann die Kupferschicht appliziert werden.

In Abb. 9 sind die fertig beschichteten Panels abgebildet. Zu sehen sind unten, die Kupferbahnen und darüber liegend, die Silber beschichteten Bahnen. Die Bahnen weisen im Querschnitt eine „Gausglocken“-förmige Verteilung auf. Das bedeutet, dass die Ränder nicht scharf zur Oberfläche getrennt sind.

Um dieses Problem zu vermeiden ist es nötig, die nicht zu beschichtende Oberfläche zu maskieren und nur die Fläche auszusparen, welche mit Kupfer beschichtet werden soll. Dies ist in Abb. 10 dargestellt. Hier sind scharfe Ränder zu dem Substrat zu erkennen.

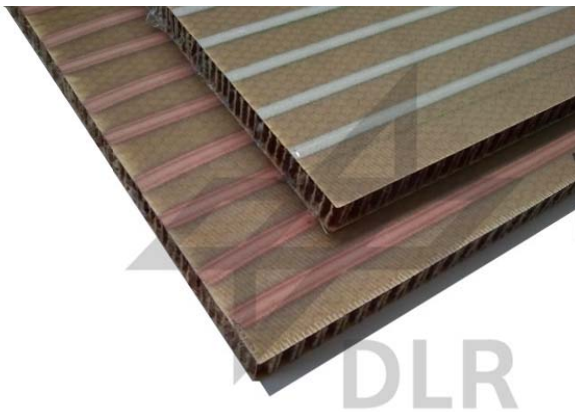


Abb. 9: Fertig beschichtete GFK Panels

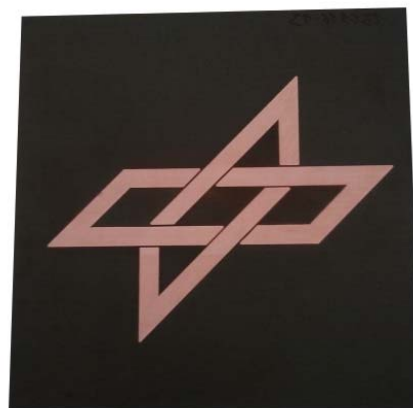


Abb. 10: DLR Logo welches mithilfe eines Maske erstellt wurde

Bei der Sichtkontrolle der Proben fällt auf, dass die Bahnen nicht immer über die komplette Probenlänge konstant parallel verlaufen, sondern kurz vor dem Ende der Probe eine Kurve beschreiben. Weiterhin sind einige GFK-Panels unmittelbar neben den Kupferbahnen dunkel verfärbt.

Die beiden beschriebenen Effekte deuten darauf hin, dass das Material dort lokal zu stark erwärmt wurde. Um dies zu validieren wird eine Thermoanalyse durchgeführt, bei der festgestellt

werden kann, ob das Material zu stark erwärmt wurde und Schäden in der Matrix aufgetreten sind.

2.1.3 Kupfer-Mesh

Um die Leitfähigkeit von dem standardmäßig verwendetem Glasfasermaterial herzustellen, wird mithilfe eines Kupfermeshes eine leitfähige Decklage auf beziehungsweise in das Material gebracht. Dieses Kupfermesh ist eine feingewalzte Kupferfolie, welche mit einem Schnittmuster versehen wird und anschließend gestreckt wird. Durch diesen Vorgang entsteht ein feinmaschiges Gitter, welches auf einer Rolle als Meterware zur Verfügung steht.

Abb. 11 zeigt eine Variation der verschiedenen Meshvariationen. Variiert werden kann hier zwischen verschiedenen Materialien und verschiedenen Herstellungsarten des Gewebes.

Für die anstehenden Untersuchungen wurde ein Kupfermesh mit der Bezeichnung 3CU7-125A. Dieses Gewebe zeichnet sich durch einen sehr geringen Widerstand von 1,4 mΩ beziehungsweise 4,2 mΩ je nach Messrichtung aus.

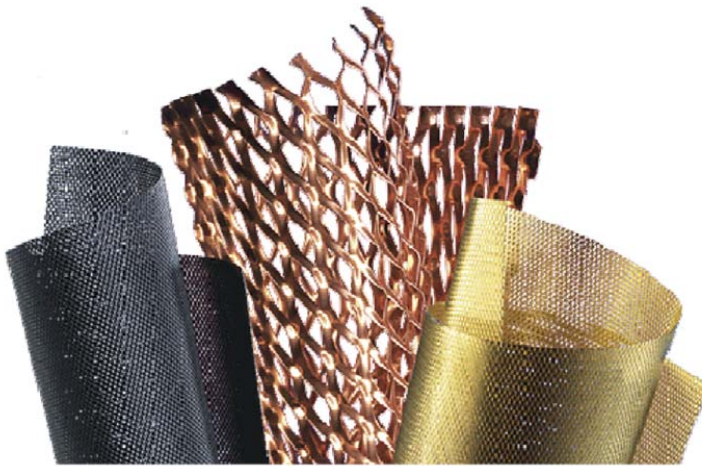


Abb. 11: Verschiedene Meshvariationen [Aero-consultants.ch]

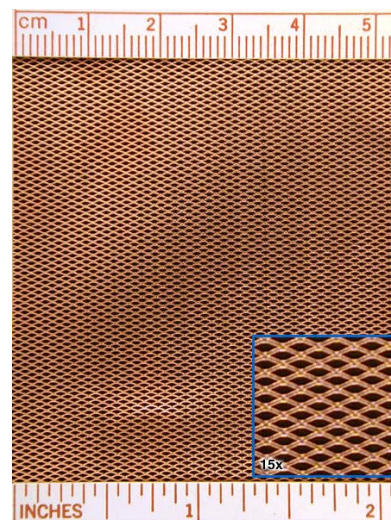


Abb. 12: Detailansicht des Kupfermeshes [Aero-consultants.ch]

Der Widerstand für flächig eingebrachte Gewebematerialien oder Metallfolien kann mithilfe der Formel des Flächenwiderstandes berechnet werden:

$$R = R_N \frac{L}{W}$$

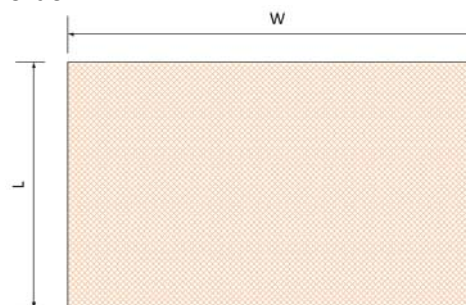


Abb. 13: Geometrische Verhältnisse des Flächenwiderstandes

Nach dieser Formel ist der Widerstand auf eine bestimmte Messstrecke lediglich von dem Seitenverhältnis W zu L abhängig. Bei einem Verhältnis von 1 entspricht der Widerstand dem spezifischen Widerstand aus dem Datenblatt des Kupfermeshes (1,4 mΩ bzw. 4,2 mΩ)

Da das Erdungspanel der Galley ca. doppelt so breit wie hoch ist eine Halbierung des Widerstandes zu erwarten. (Vergleiche hierzu den Halbjahresbericht der Firma SELL)

2.1.4 Bewertung und Auswahl der Konzepte

Bei der Prototypenfertigung mit einer integrierten Kupferfolie ist die äußerste Deckschicht eines Glasfaseraufbaus abgeplatzt. Hier wurde deutlich das die Kupferfolie eine Barriere innerhalb des Matrixsystems und der einzelnen Glasfaserlagen darstellt. Eine strukturelle Integrität ist nicht mehr gegeben.

Ein nachträgliches flächiges aufkleben der Folie hat sich als nicht praktikabel herausgestellt. Aus den hier genannten Punkten wurde das Konzept der applizierten Kupferfolie nicht weiter verfolgt. Widerstandsmessungen an den Kupferbahnen, welche mit dem Plasmastrahl erstellt wurden, haben ergeben, dass der Widerstand einer einzelnen Bahn bei 16 Ω liegt. Damit ist der Widerstand um ein vielfaches zu hoch für die Erdungsanwendung. Das Konzept des Atmosphärendruckplasmas muss daher verworfen werden.

Das beschriebene Problem der Barriere bei der Kupferfolie wird mithilfe des Kupfermeshes umgangen, da durch die Maschen des Meshes eine Mikroverzahnung innerhalb des Faserverbundes erzielt wird. Delaminationen sind bei diesem Verfahren nicht zu erwarten. Auch ist, bedingt durch die extrem geringen Widerstandswerte, eine Erfüllung der geforderten Richtlinien zu erwarten.

Für die weiteren Untersuchungen wurde die Integration des Kupfermeshes weiter detailliert untersucht.

2.2 Konzeptvalidierung an einem Sandwichbauteil

Nachdem die gemeinsame Konsolidierung des Kupfermeshes und der Glasfaserdeckschicht erfolgreich validiert wurde, wurden anschließend erste Sandwichpanels mit einem integrierten Kupfermesh gefertigt. Abweichend zu dem finalen Aufbau wurde das Kupfermesh auf beiden Seiten des Kernes appliziert und anschließend mit einer Glasfaserdeckschicht versehen. Das fertig ausgehärtete Sandwichpanel ist in dargestellt.

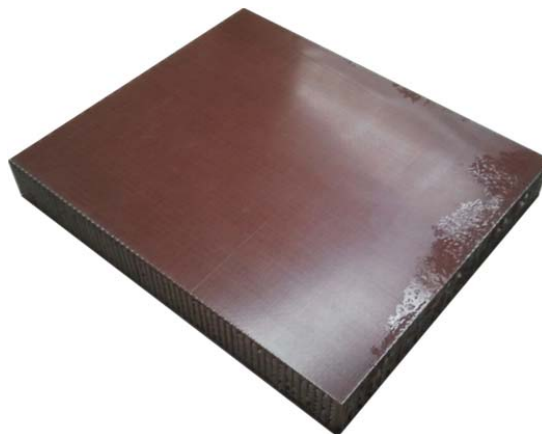


Abb. 14: fertig konsolidiertes Sandwichpanel

Biegetest

Um zu zeigen, dass sich die modifizierte Decklage weiterhin umformen lässt, wurde ein Vorversuch durchgeführt um das Konzept abzusichern.

Um die Umformung erreichen zu können, wurde ein Verfahren gewählt, welches die Decklagen auf Rückseite des Panels anschlitzt und somit eine Verformung in Größe des Spaltes zulässt.

Abb. 15 zeigt links das unbearbeitete Panel und rechts das fertig geschlitzte Panel. Mittig ist der Zwischenschritt zu erkennen bei dem erst ein Schnitt eingebracht wurde.

Die Spalte wurden mithilfe einer Panelsäge in das Material eingebracht. Diese wurde so eingestellt, dass das Sägeblatt kurz unterhalb der ersten Decklage schneidet und diese nicht beschädigt.

Für einen Umformwinkel von ca. 60 ° wurden 11 Schnitte in die hintere Decklage eingebracht.

Es wurden alle 6 mm ein Schnitt durch das Material gesetzt. Bei einer Sägeblattbreite von 3 mm ergibt sich dann ein Muster von gleichbreiten Stegen und Nuten.



Abb. 15: Biegeversuch Panel Vorbereitung

Nach dem Schlitzten der Struktur wurden mit Hilfe eines Zweikomponenten-Strukturklebers die Fugen wieder verfüllt und das Sandwich auf den gewünschten Radius gebogen, um es in dieser Position aushärten zu lassen.

Als Klebstoff wurde der EC-9300 FST verwendet. Dieser Klebstoff wird auch im laufenden Betrieb bei der Firma SELL zum Herstellen der Galleys verwendet.

Das fertige, ausgehärtete Musterbauteil ist nachfolgend in Abb. 16 dargestellt.

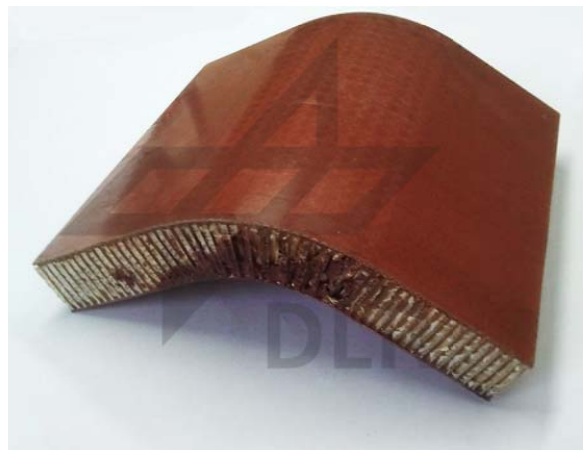


Abb. 16: Fertiges und ausgehärtetes Musterbauteil

Mit diesem Demonstrator konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, das bisher verfolgte Konzept der modifizierten Deckschicht mit dem integrierten Kupfermesh genauso umzuformen wie es für die Demonstratorgalley notwendig ist.

2.3 Elektrische Anbindung

2.3.1 Herkömmliche Kontaktierung

Aktuell werden bei der Firma Sell die Erdungspunkte aufwendig mit sieben Bauteilen hergestellt. Abb. 17 zeigt diesen Aufbau und die entsprechenden Einzelteile. Neben den erwähnten Bauteilen muss hier, neben der Bohrung, zusätzlich die Oberfläche des Panels vorbehandelt werden um das Bauteil zu kontaktieren.

Ein erster Ansatz an dieser Stelle ist der Einsatz von „unterkopfprofilierten“ Schrauben. Diese Schrauben weisen eine so scharfkantige Kontur auf der Unterseite des Schraubenkopfes auf, das dieses Profil sich beim Einschraubvorgang in die Oberfläche des Panels schneidet und somit durch die ober Harzschicht hindurch einen leitenden Kontakt zu dem Kupfermesh herstellt. Diese Schraube ist in Abb. 18 zu sehen. Die obere Teil der Schraube weist ein metrisches Gewinde. Dieser Teil der Schraube stellt das Anbindungsgewinde für die Kabelschuhe und die Sicherungsmutter da.

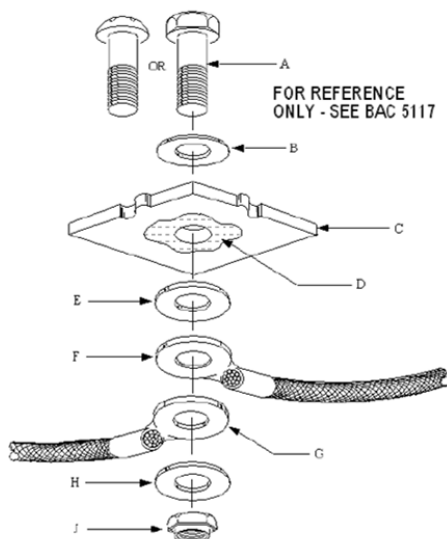


Abb. 17: Herkömmlicher Aufbau eines Erdungspunktes



Abb. 18: Integralschraube der Firma Ejot

2.3.2 Nietkonzept

Abb. 19 zeigt den prinzipiellen Vorgang des Kontaktierens während des Nietvorganges. In der Abbildung sind nur die Deckschicht des Panels, der Niet und der Kabelschuh dargestellt. Die Deckschicht des Glasfaserpanels wird mit einer für den Niet entsprechenden Bohrung versehen. Anschließend wird der Ringkabelschuh positioniert und der Niet gesetzt. (vgl. linken Teil der Abbildung)

Der rechte Teil der Abb. 19 zeigt den bereits deformierten Niet. Die Deformation des Niets sorgt dafür, dass das Kupfermesh mit einer radialen Flächenpressung kontaktiert wird. Eine Anbindung mit einer entsprechenden Leitpaste ist nicht notwendig. Es wird ersichtlich, dass der Niet für die Anbindung an das Kupfermesh verantwortlich ist und nicht der Kabelschuh. Das bedeutet, dass die Auswahl des Nietes von großer Bedeutung ist, da an dem Niet insgesamt zwei Übergangswiderstände auftreten. Einmal von dem Kabelschuh in den Niet und ein weiteres Mal von dem Niet in das Kupfermesh. Am Haupterdungspunkt findet dieser Vorgang natürlich in umgekehrter Reihenfolge statt.

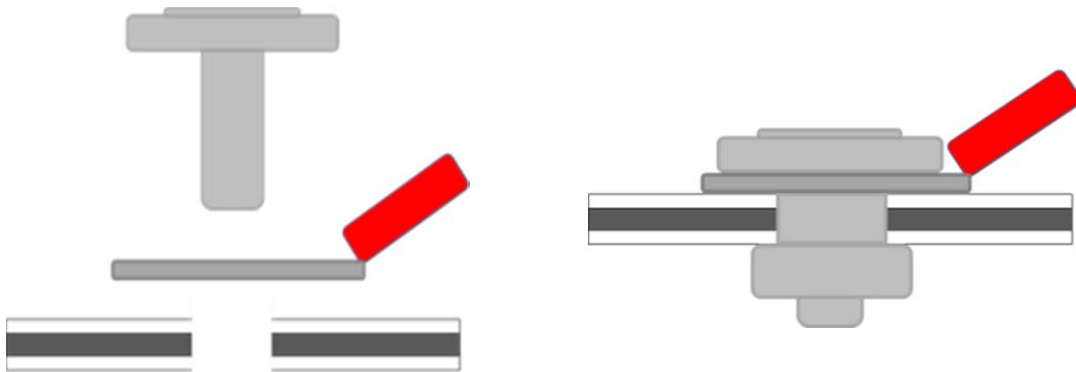


Abb. 19: Prinzipieller Nietvorgang

2.3.3 Nietauswahl

Für weitergehende Untersuchungen ist es von Interesse, ob die Nietgeometrie und das Nietmaterial einen Einfluss auf den Übergangswiderstand zwischen Niet und Heizstruktur haben. Hierfür wurden sieben verschiedene Niete ausgewählt, welche sich sowohl in dem Durchmesser als auch in der Materialbeschaffenheit unterscheiden. Ausgewählt wurden Niete mit einem Durchmesser von drei bis sechs Millimetern, sowie Niete aus Aluminium und Kupfer. Aufgrund der relativ weichen Materialeigenschaften von Kupfer gibt es keine reinen Kupferniete, da der Dorn in diesem Fall zu früh abreißen würde. Auch sind Kupferniete in einer Größe von 6 mm nicht verfügbar. Um eine einseitige Zugänglichkeit bei der Montage gewährleisten zu können, wurden nur Blindniete verwendet. Die verschiedenen Niete wurden paarweise in eine GFK-Platte eingebracht, in welche in der neutralen Faser ein Kupfermesh eingelegt ist.



Abb. 20: Testaufbau um den Widerstand der Nietpaarungen zu bestimmen



Abb. 21: Detailansicht des Testaufbaus

Anschließend wurde der Widerstand zwischen den einzelnen Paarungen bestimmt. Die Messstrecke von Niet zu Niet beträgt 330 mm (± 1 mm). Das Ziel dieser Messung ist es, den besten Widerstandswert zu bestimmen, welcher sich für eine Nietpaarung ergibt. Da der Messwert aus zwei Übergangswiderständen und dem Widerstand des Kupfermeshs zwischen den Messpunkten besteht, ist dieser Wert nur zum Vergleichen der Nietpaarungen untereinander aussagekräftig. Auch ist in diesem Messaufbau der Einfluss der Orientierung des Kupfermeshs nicht berücksichtigt.

In Tab. 1 sind die verschiedenen Niete mit den jeweiligen Durchmessern dargestellt. Der eingetragene Widerstandswert ist der Wert für jeweils ein Paar gleicher Niete. Die besten

Ergebnisse liefern die beiden Aluminium Niete mit einem Durchmesser von vier beziehungsweise sechs Millimetern.

Material	Durchmesser / mm	Widerstand / mΩ
Kupfer/Bronze	3	2,1
Kupfer/Bronze	4	2,2
Kupfer/Edelstahl	4	1,6
Kupfer/Stahl	4	2,1
Aluminium	3	2,6
Aluminium	4	1,5
Aluminium	6	1,5

Tab. 1: Widerstandswerte verschiedener Niet Typen

Eine Verringerung des Widerstandes durch den größeren Radius und die dadurch vergrößerte Kontaktfläche ist ab einem Durchmesser von 4 mm nicht mehr zu detektieren.

Der Kupferniet mit dem Edelstahldorn hat auf der gesamten Strecke nur einen um 0,1 mΩ geringeren Widerstand als die beiden besten Aluminiumniete. Eine Materialpaarung von Aluminium und Kohlenstofffaser führt zu einer sogenannten Kontaktkorrosion, da die beiden Materialien in der elektrochemischen Spannungsreihe weiter als 0,4 V auseinander liegen (1). Um diesem Problem und der damit bedingte Korrosion zu entgehen, fällt die Wahl des Kontaktnietes für die weiteren Untersuchungen auf den angesprochenen Kupferniet mit Edelstahldorn.

2.4 Erarbeitung des Referenzmodelles

Um die Leistungsfähigkeit des neuen Erdungskonzeptes zu validieren, muss ein Versuchsaufbau gefunden werden, mit dessen Hilfe es möglich ist, den neuen Aufbau mit einem herkömmlichen Aufbau zu vergleichen. Hierzu hat die Fa. SELL einen Vorschlag gemacht, der in Abb. 22 visualisiert ist.

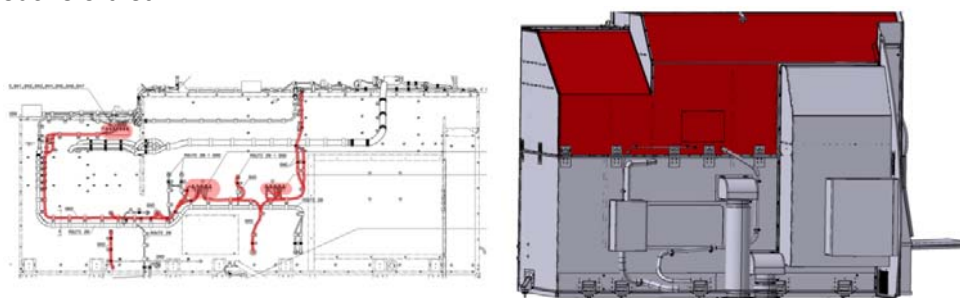


Abb. 22: Überführung eines konventionellen Erdungsstrangs in einen Flächenschutzleiter

Ausgehend von dieser Vereinfachung wurden Coupon-Referenz Modelle erstellt um eine Vergleichbarkeit zu erzielen.

In Abb. 23 ist links der minimale Aufbau einer herkömmlichen Galleyerdung zu sehen. Hierzu gehören die Zuleitungskabel links und rechts, die Kabelbrackets (Alu-Omega Profile) und die redundante Kabelstrecke in der Mitte. Eine genauere Beschreibung der Referenzprobe findet sich in einem Halbjahresbericht der Firma Sell.

Auf der rechten Seite von Abb. 23 sieht man den daraus abgeleiteten Versuchsaufbau für das Bondingpanel. Die beiden Zuleitungskabel sind weiterhin vorhanden sind, aber in diesem Fall direkt an die Kupferschicht angeschlossen.

Die Länge der Zuleitungen, sowie die relevante Messstrecke sind in beiden Aufbauten identisch. Die Messergebnisse sollten somit vergleichbar sein.

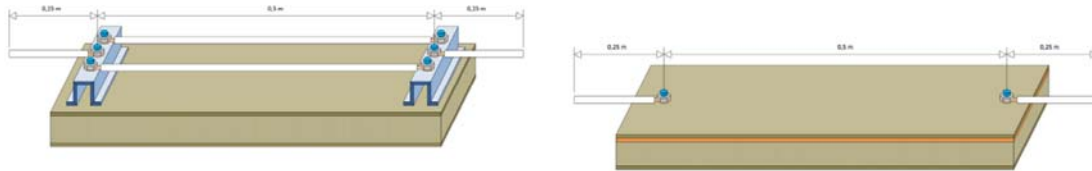


Abb. 23: Coupon Referenz Modell der Erdungsverkabelung

Für beide Proben wurde der Widerstand bestimmt und verglichen. Die Werte der Referenzprobe liegen leider nur als berechnete Daten und nicht als real gemessene Werte vor. Tobias Krämer von der Firma SELL spricht von einem Widerstand von 12,00mΩ der sich zwischen den Messpunkten einstellen soll. Der Auszug der Berechnung ist nachfolgend in Tab. 2 dargestellt.

Konventionelles Bonding				
Objekt / Übergang >>>	Typ	R_N	Dim.	
Zuleitung	AWG 16	15,60 mΩ	0,25 [m] x 2	7,80 mΩ
Zuleitung >>> Kabelschuh	Press	0,00 mΩ	x 2	0,00 mΩ
innerhalb Kabelschuh	massiv	0,00 mΩ	x 2	0,00 mΩ
Kabelschuh >>> Bracket	Schraub	0,10 mΩ	x 2	0,20 mΩ
innerhalb Bracket	massiv	0,00 mΩ	x 2	0,00 mΩ
Bracket >>> Kabelschuhe	Schraub	0,10 mΩ	x 2 / 2	0,10 mΩ
innerhalb Kabelschuhe	massiv	0,00 mΩ	x 2 / 2	0,00 mΩ
Leitungen	AWG 16	15,60 mΩ	0,5 [m] / 2	3,90 mΩ
Summe				12,00 mΩ

Tab. 2: Berechneter Widerstand für die Referenz Probe [SELL]

Die Probe für das Bondingpanel wurde in mehrfacher Ausführung gefertigt. In die Proben wurden unterschiedlich viele Lagen Kupfermesh eingebracht um den Einfluss der Dicke zu erfassen. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 dargestellt.

Material	Richtung	Widerstand / mΩ
2 Lagen Kupfermesh	0°	2,8
2 Lagen Kupfermesh	90°	2,6
3 Lagen Kupfermesh	0°	1,6
3 Lagen Kupfermesh	90°	1,9

Tab. 3: Messergebnisse der Coupon Bonding Probe

Die Widerstandsmessungen liegen deutlich unterhalb der berechneten Widerstände des Referenzaufbaus.

2.5 Verbesserung der Robustheit

Beim Handling mit den Probekörpern ist aufgefallen, dass die Nietkontakte bereits bei geringen Lasten aus der Deckschicht ausreißen. Als Ursache für das Ausreißen der Niete ist die zu geringe Wandstärke der Deckschicht identifiziert worden. Die verwendeten Niete benötigen eine minimale Wandstärke, welche höher ist als die Deckschicht stark ist.

Eine lokale Aufdickung der Deckschicht ist somit im Bereich der Kontaktstelle notwendig. Es werden vier verschiedene Deckschichtverstärkungen untersucht. Diese unterscheiden sich sowohl im Material, als auch in der Wandstärke. Es werden zwei Deckschichtverstärkungen aus Aluminium verwendet, welche eine Stärke von 2 mm beziehungsweise 2,5 mm aufweisen. Die andern beiden Verstärkungen bestehen aus einem bereits ausgehärteten Glasfasergewebe welches 1,5 mm beziehungsweise 2 mm stark ist. Die vier Materialien werden in 50 mm x 50 mm Plättchen zugeschnitten und mit dem geprüften Klebstoff Scotch Weld EC-9300 FST mit der Deckschicht verklebt.

Anschließend wird die passende Bohrung erstellt und der Niet inklusive des entsprechenden Kabelschuhes befestigt.

Ein Verdrehen der Niete, so wie es vorher zu beobachten war, ist jetzt nicht mehr möglich. Abb. 24 zeigt den modifizierten Aufbau des Nietkonzeptes mit einer Aluminium Aufdickung (links) und einem Glasfasergewebe (rechts).



Abb. 24: Verstärkung des elektrischen Kontaktpunktes

Um die Ausreißfestigkeit der modifizierten Proben verifizieren zu können, werden die Proben in eine Prüfmaschine eingespannt und der Niet an dem Kabelschuh senkrecht heraus gezogen. In Abb. 25 ist links die Einspannung dargestellt mit deren Hilfe die Probe niedergehalten wird. Die Einspannung ist so gewählt, dass lediglich die Deckschicht des Panels berührt wird. Der Bereich der Aufdickung bleibt von der Einspannung unberührt.

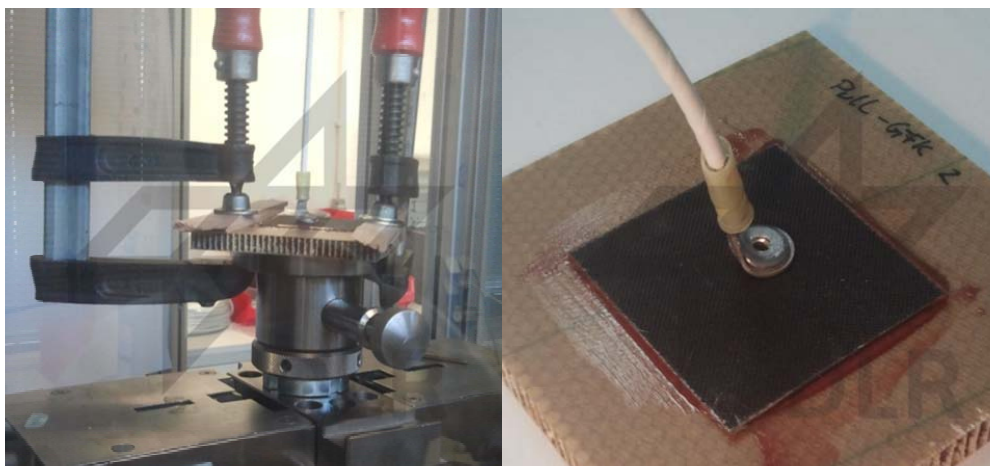


Abb. 25: Einspannung in der Zug-Prüfmaschine

Nach dem die Zugmaschine anfährt und das Kabel der Kontaktstelle spannt, biegt sich der Kabelschuh schnell in Lastflussrichtung. Der Kabelschuh lässt sich mit sehr wenig Kraftaufwand umformen. Vergleiche hierzu den rechten Teil der Abb. 25. Erst nach diesem Vorgang kann die Prüfmaschine die entsprechende Last aufbringen.

In Abb. 26 ist die Kraft der Prüfmachine in Newton über dem Traversenweg in Millimeter für die vier Proben aufgetragen.

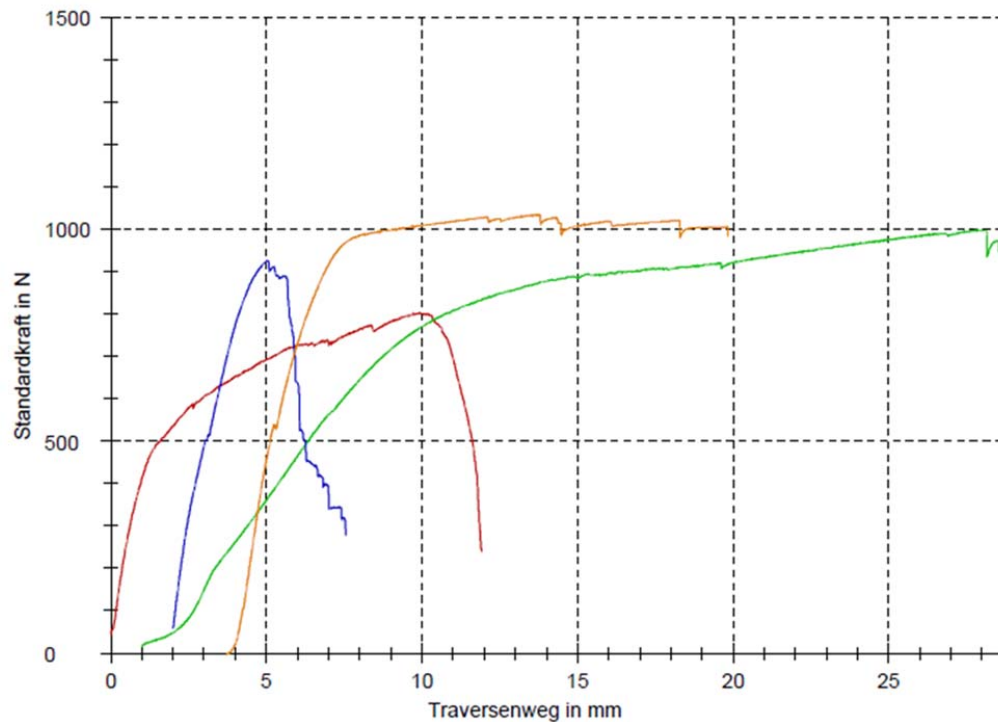


Abb. 26: Kraft Weg Diagramm der Ausreißversuche

Die rote Kurve ist die Lastkurve der 1,5 mm starken Verstärkung aus Glasfasergewebe. Diese Probe ist die einzige Probe die im Kontaktpunkt, direkt in der Deckschicht beziehungsweise der Aufdickung, kaputt gegangen ist. Die Deckschicht versagt bei ca. 800 Newton (vergleiche hierzu Abb. 27). Bei allen weiteren Versuchen versagt das Kabel in der Einspannung der Zugmaschine bei ca. 1000 Newton. An der Kontaktstelle ist kein Versagen zu erkennen.

Das Ergebnis ist ausreichend, um die Aussage treffen zu können, dass eine Wandaufdickung von 2 mm ausreichend ist, um eine genügend hohe Sicherheit gegen Ausreißen der Kontaktstellen sicher zu stellen. Tab. 4 fasst die einzelnen Messergebnisse noch einmal zusammen.

Tab. 4 Ergebnisse des Ausreißversuches

Aufdickung	zusätzliches Gewicht	Ausreißkraft
Alu 2 mm	13,06 g	> 1000 N
Alu 2,5 mm	19,68 g	> 1000 N
GFK 1,5 mm	5,90 g	803 N
GFK 2 mm	9,63 g	> 1000 N



Abb. 27: Ausgerissener Kabelschuh

Da die Aluminiumaufdickungen, sowie die 2 mm starken Glasfaserplättchen keine messbaren Unterschiede aufweisen, wird mithilfe der Gewichtsdaten aus Tab. 4 die Glasfaserplatte als Verstärkung gewählt, da diese Platte die geringste Gewichtszunahme bedeutet.

Eine Reduzierung der Aufdickungsfläche ist denkbar, da die Schadensfläche beim Versagen des Kontaktpunktes sehr gering ist.

Durch die hier beschriebene Modifikation ist ein zusätzlicher Arbeitsschritt notwendig geworden (Verkleben der Deckschichtverstärkung). Auch eine leichte Gewichtszunahme von effektiv 9,6 g pro Kontaktpunkt ist unentbehrlich um ein robustes Nietkonzept und eine sichere Kontaktierung gewährleisten zu können.

2.6 Trommelschälversuch

Das Einbringen des Kupfermesh ist ein massiver Eingriff in die Festigkeit des Panels selber. Es muss sichergestellt werden, dass die Anbindung der Deckschicht an die Wabe nicht massiv eingeschränkt oder vermindert wird. Ein mechanisches Versagen der Deckschicht bei Lasteinleitung darf nicht früher auftreten, als bei den herkömmlichen Sandwichpanelen.

Um die Anbindung der Deckschicht an die Wabe zu überprüfen, kann der sogenannte Trommelschältest angewendet werden. Zu diesem Zweck wird eine Apparatur in eine Zug-Prüfmaschine eingespannt, welche die reine Zugkraft über zwei Stahlbänder in einen Zylinder einleitet. Dieser Zylinder wiederum rollt sich auf der Deckschicht des Panels ab und schält die einseitig eingespannte Deckschicht mit einem definierten Radius von 50 mm von der Wabe ab. Die eingebauten Kraftsensoren der Prüfmaschine lassen sich dann dafür verwenden, die Kraft zu dokumentieren, die benötigt wird um die Deckschicht vom Kern abzulösen. In Abb. 28 ist die Einspannung für die Zugmaschine dargestellt. In Abb. 29 ist ein Teil der Sandwichprobe zusehen, wie sie für den Trommelschälversuch vorbereitet wird. Um die Probe für die Einspannung vorzubereiten, werden Rückseitig zwei Taschen eingefräst, welche die hintere Deckschicht und den Kern bis unmittelbar unterhalb der vorderen Deckschicht entfernt. Die beiden überstehenden Laschen der vorderen Deckschicht werden in die Zugvorrichtung eingespannt.

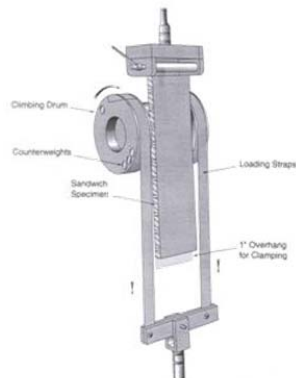


Abb. 28: Einspannung Trommelschälversuch

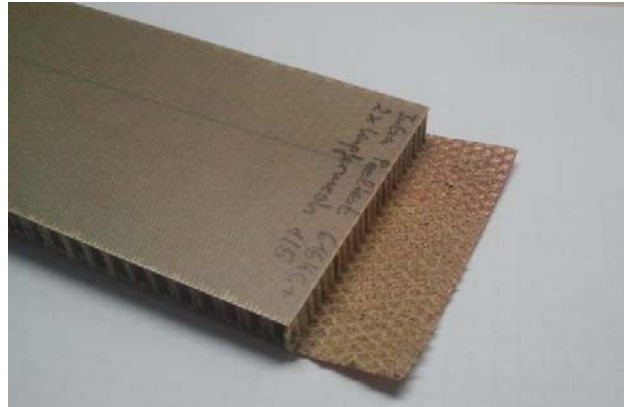


Abb. 29: Die für den Trommelschälversuch vorbereitete Probe

Für eine statistische Sicherheit wurden fünf Proben vorbereitet und geprüft. In Abb. 30 ist der Kraft-/Wegverlauf der fünf Proben während des Schälversuches dargestellt.

Mit dem Starten des Zugversuches baut sich die Kraft stetig auf. Da in dieser Phase verschiedene Einflüsse wie Initialrisse und Setzerscheinungen auftreten, wird für die Versuchsauswertung und die Berechnung der Schälkraft die ermittelte Kraft erst ab einem Verfahrweg von 50 mm dokumentiert.

Seriengrafik:

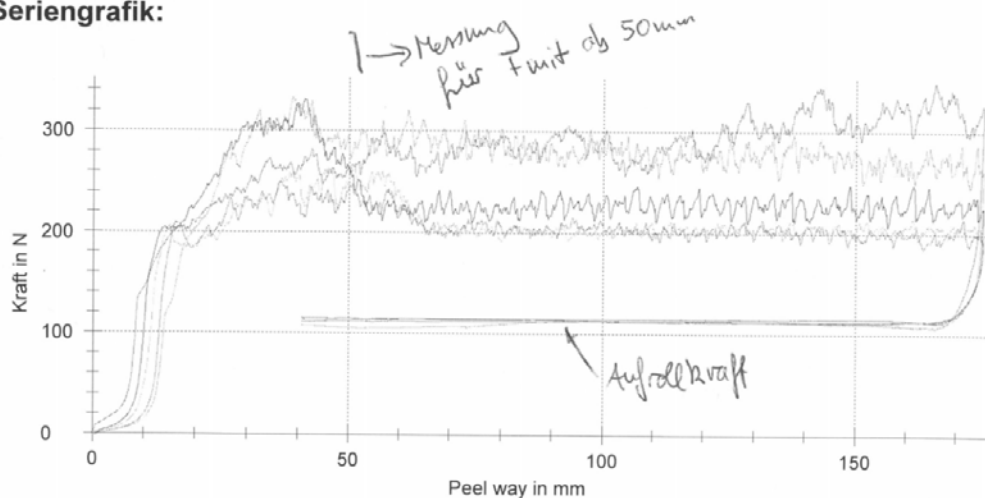


Abb. 30: Prüfprotokoll Trommelschälversuch

Ab diesem Verfahrweg wird die Abschälkraft der Deckschicht auf einer Strecke von ca. 120 mm aufgezeichnet und für jede Probe der Mittelwert berechnet. Diese Mittelwertbildung ist notwendig, da durch den Wabenkern und die lokal unterschiedlichen Klebeflächen eine gewisse Inhomogenität beim Abschälen auftritt.

Nach dem Ablösen der Deckschicht verfährt die Prüfmaschine in umgekehrte Richtung. Hierbei wird wiederum eine Kraft gemessen. Diese Kraft gibt eine Aussage darüber, wie hoch der Widerstand der Deckschicht gegenüber einer Verformung (aufrollen) ist. Gemessen wird hier die sogenannte Aufrollkraft. Die Differenz aus dem Mittelwert der Abschälkraft (F_{mit}) und der Aufrollkraft ergibt die reine Peel Force. Dies ist die Kraft, die notwendig ist, um die Deckschicht von dem Wabenkern, unter den gegebenen Randbedingungen, zu lösen.

Tab. 5 fasst die Ergebnisse der fünf Proben des Trommelschälversuches noch einmal zusammen.

Tab. 5 Ergebnisse Trommelschälversuch

Nr	Probenkennung	F _{mit} N	Aufrollkraft N	Peel Force N
1	1/5	285	112	173
2	2/5	284	111	174
3	4/5	240	113	127
4	4/5	215	114	100
5	5/5	211	115	96

Während der Mittelwert der Abschälkraft mit 74 Newton recht stark schwankt, liegt die Aufrollkraft der Deckschichten ziemlich konstant bei 113 N (+/- 2 N).

Die Wabenspezifikation der Firma SELL schreibt vor, dass die Peel Force der einzelnen Lagen eine Kraft von 100 Newton nicht unterschreiten darf. Drei der Proben überschreiten diese Grenze deutlich, eine Probe erreicht den Wert genau und eine Probe liegt mit vier Newton knapp unter der geforderten Kraft.

Sollte das Bondingpanel zu einem Serieneinsatz kommen, müsste in einem Qualifizierungsprüfprogramm herausgefunden werden, woher diese Streuung der Messergebnisse herrührt.

2.7 Seriennahe Konzeptrealisierung

Nach dem Abschluss der Voruntersuchungen kann die Produktion des gesamten Erdungspanels gestartet werden. Um den Prozess möglichst seriennah gestalten zu können, wird das Erdungspanel, so wie alle weiteren Panels welche in der Galley verbaut werden, bei der Firma Schütz gefertigt.

Die Firma Schütz hat für eine solche Prototypenfertigung eine gesonderte Forschungspressen, mit deren Hilfe Sandwichkern bis zu einer Größe von 3 m² gefertigt werden können. Auf dieser Presse wurde das Bondingpanel, welches für die späteren Tests verwendet wird, gefertigt.

Die zwei Lagen Kupfermesh werden zwischen der Wabenstruktur und der Decklage aus GfK eingebracht. Die Kupfermesh Lagen werden um 90° zueinander verdreht um die unidirektionalen Eigenschaften des Kupfermeshes zu homogenisieren.

Rückseitig schließt die Deckschicht aus GfK direkt an den Wabenkern an. Der gesamte Aufbau wird in der Plattenpresse unter Druck und Temperatur zum Aushärten gebracht. Anschließend kann die Platte entnommen und besäumt werden.



Abb. 31: Drapiertes Kupfermesh auf dem Kern



Abb. 32: Kupfermesh und Kunststoffüll

Die Firma Schütz verwendet zusätzlich einen Kunststoffüll welcher den Harzfluss des Glasfaserprepregs steuert und die Anbindung des GfKs erhöht. Dieser Tüll wird oberhalb des

Kupfermeshes drapiert. (Abb. 32) Ebenfalls ist in der Abb. 32 zu erkennen, dass das in der Breite begrenzte Mesh, durch eine überlagerte Fläche von circa fünf Zentimetern verbreitert werden kann.

Anschließend wird die Glasfaserdeckschicht auf dem gesamten Aufbau drapiert:



Abb. 33: Drapieren der Glasfaserdeckschicht

Nach der Fertigstellung des Aufbaus wird dieser in der Presse ausgehärtet und auf die richtige Wandstärke gebracht.

2.8 Herstellung des Demonstrators

Nach dem Abkühlen des Erdungspanels kann dieses weiter verarbeitet werden. Zu diesem Zweck wird das Panel auf einer CNC-Fräse positioniert und bearbeitet. Mithilfe der Fräse können sowohl die Kontur als auch sämtliche Taschen bzw. Biegeschlitzte erstellt werden. In Abb. 34 ist die fertig besäumte Galleyrückwand dargestellt wie zu zur Systemintegration an die Firma SELL geliefert wurde.

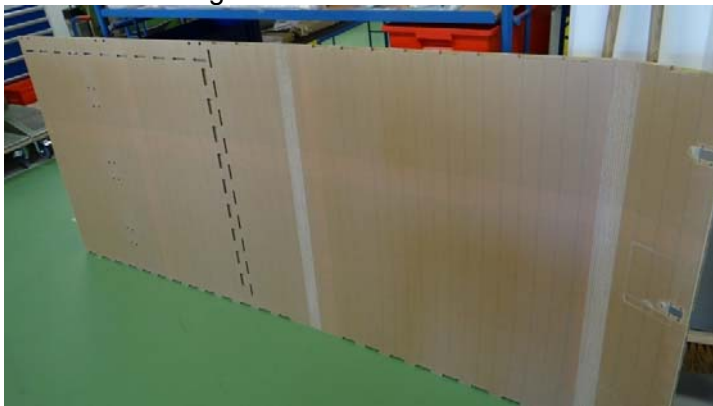


Abb. 34: Fertig besäumte Bonding Rückwand



Abb. 35: Detailansicht des geschlitzten Panels

Abb. 35 zeigt die in Kapitel 2.2 bereits beschriebenen Schlitzte die notwendig sind um dem bereits konsolidierten Panel einen Biegeradius aufzuprägen. Insgesamt gibt es zwei dieser Schnittstellen an dem Panel (vgl. Abb. 34)

Nach Erhalt aller Einzelteile wurde die Demonstrator Galley bei der Firma SELL zusammengebaut. Das fertige Ergebnis ist in Abb. 37 dargestellt. Dem gegenüber steht der konventionelle Aufbau der Rückwand in Abb. 36. Deutlich zu erkennen ist Reduzierung der

extern verlegten Kabel und deren Befestigungen. Insgesamt hat eine Gewichtseinsparung von 30%, auf die gesamte Rückwand bezogen, stattgefunden.



Abb. 36: Konventioneller Erdungsaufbau einer Galleyrückwand



Abb. 37: Modifiziertes Bondingpanel der Demo-Galley

Abb. 38 zeigt eine Detailansicht der Erdungspunkte wie sie für die Galley umgesetzt wurde. Es sind insgesamt vier Kontaktpunkte zu erkennen. Die unteren Beiden sind nach dem DLR Konzept ausgeführt worden, während die obere beiden Anschlusspunkte ein Kontaktversuch der Firma SELL darstellen. Das Konzept der Firma SELL sah vor, die Oberfläche abzutragen und das Mesh direkt zu kontaktieren. Allerdings ist der Übergangswiderstand hierbei bedeutend schlechter.



Abb. 38: Detailansicht des Bondingpanels und der Kontaktstellen

3 Eingehende Darstellung: AP3 und AP4 - LED und OLED Integration

3.1 Allgemeine Arbeiten

Im Zuge des AP3, der Integration von LED-Technologien in Faserverbundstrukturen, wurden von Seiten des DLR zwei Lampenkonzepte erarbeitet, die jeweils eine LED enthalten.

Zusammen mit Zodiac Cabin Control (ZCC) wurde eine RGBW-LED der Firma Cree ausgesucht. Diese LED soll für ein Worklight als Arbeitslicht betrieben werden. Hierfür wird der weiß-Anteil der LED den Hauptteil des Lichtes erbringen und die Farben Rot, Grün und Blau beeinflussen die Lichtstimmung der gesamten Leuchte.

In einem ersten Entwurf wurde ein Konzept erstellt, bei dem die komplette Elektrik und Anschlussperipherie der LED in einem Schaumkern zusammengefasst wurde. Vergleiche hierzu Abb. 39. Auf diese Weise ist es möglich, die LED an einem gesonderten Raum unter Reinraumbedingungen auf die Platine zu löten und anschließend das Schaummodul in das HC-Panel einzulegen.

Der Schaumkern selber besteht aus einer dünnwandigen, blickdichten Struktur. Die Wandstärke beträgt ca. 5 mm. In diesem Schaumkern wird die LED mitsamt der Anschlussplatine positioniert. Den Abschluss der Baugruppe bildet ein 2 mm starker, diffuser Deckel, welcher bündig auf der Seitenwand befestigt wird.

Passend zu dieser Baugruppe wird in einem nächsten Schritt der negativ Abdruck des Schaumkernes in den Nomex-Wabenkern geätzt. Abschließend werden die Decklagen, der Nomex-Kern und der Schaumkern miteinander verklebt und unter Druck in der Presse ausgehärtet.

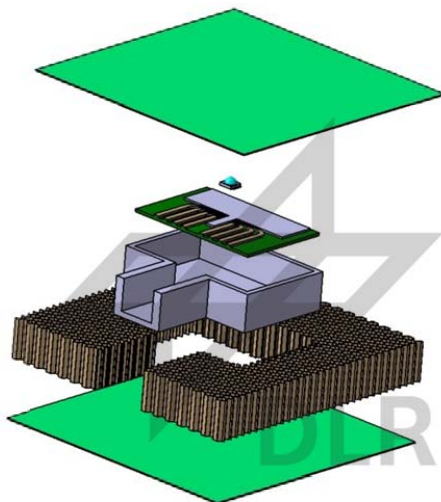


Abb. 39: erstes Leuchtenkonzept

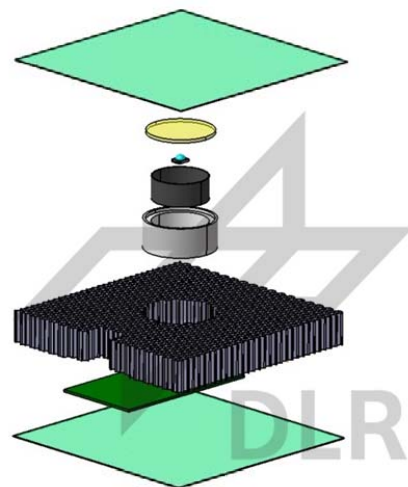


Abb. 40: erweitertes Leuchtenkonzept

Nach der Fertigung der ersten Leuchten-Version ist festgestellt worden, dass der Eingriff in den Nomexkern so groß war, dass eine messbare Störung der Struktur aufgetreten ist. Daher ist der Einsatz der Leuchte in strukturell belasteten Bereichen nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wurde eine überarbeitete Version der Leuchte konstruiert, bei der der Eingriff in den Kern lokal begrenzt ist.

In Abb. 40 ist die Explosionsdarstellung der zweiten Leuchte zu sehen. Der Ausschnitt im Nomexkern und der Schaumkern selber sind bedeutend kleiner konstruiert. Ein kreisrunder Ausschnitt verringert die Spannungsspitzen in den Ecken. Zusätzlich ist noch eine Metallfolie hinzugekommen, welche das entstehende Streulicht bündelt und fokussiert.

Um weiterhin einen elektrischen Anschluss zu gewährleisten, muss die Platine auf der Rückseite der Leuchte innerhalb des Sandwichaufbaus positioniert werden. Hierfür wird ein Ausschnitt erstellt, der genau so tief ist, wie die Platine dick ist. An dieser Platine kann die Versorgung der LED stattfinden.

Während bei der ersten Version erhebliche Deformationen bei einer lokalen Krafteinleitung festzustellen waren, sind solche Effekte bei dem zweiten Entwurf nicht mehr zu detektieren. Sowohl der runde Ausschnitt der Kerne, als auch die Metallfolie als Reflektor wirken sich positiv auf das Leuchtbild des Lichtstrahls aus.

Problematisch bei diesem Konzept ist die Austauschbarkeit der LED. Diese ist aufgrund der Fertigungsmethode nicht gegeben.

3.2 Austauschbarkeit der Leuchtmittel

Innerhalb eines bilateralen Treffens zwischen dem DLR Braunschweig und der Firma Zodiac Cabin Controls (ZCC) wurden Reparaturkonzepte für defekte Leuchtmittel entworfen.

Es wurde aufgrund der Austauschbarkeit von defekten LEDs ein Konzept entwickelt, welches vorsieht, nicht die LEDs, sondern nur einen Lichtleiter, den sogenannten Light Guide zu integrieren. Das Konzept sieht vor, den transparenten Light Guide zusammen mit einer Reflektorfolie und einer Polycarbonat-(PC) Folie in das Honeycomb zu integrieren. Die PC-Folie sorgt aufgrund ihrer diffusen Eigenschaften für eine homogene Lichtausbeute. Gleichzeitig sorgt sie für einen gewissen Schutz des Light Guides. Nachfolgend in Abb. 41 ist der schematische Aufbau dargestellt, wie ihn sich ZCC vorgestellt hat.

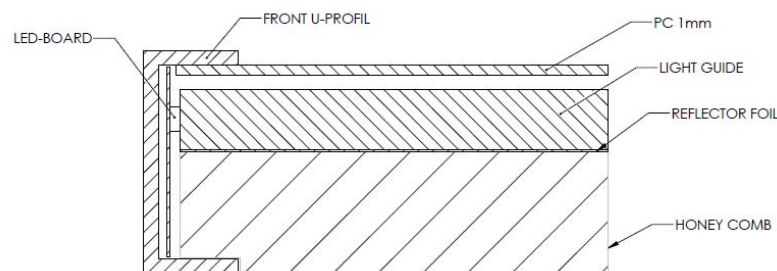


Abb. 41: Aufbau des Light Guides [Quelle: Zodiac Cabin Controls]

Seitlich von dem eben beschriebenen Querschnitt leuchten ein LED Streifen in den Guide ein, welcher das Licht flächig über die gesamte Fläche abgibt.

Mit diesem Aufbau soll eine Leuchte konstruiert werden, die in einem Regalboden verbaut ist und das Licht auf die Arbeitsfläche der Galley nach unten abgibt.

Der Light Guide wurde von ZCC an das DLR ausgehändigt, damit dieser in einem Honeycomb integriert werden kann.

Für die Integration des Lightguide gibt es zwei Möglichkeiten, das Lightguide mit der Sandwichstruktur zu verbinden. Beide Möglichkeiten sind in Abb. 42 schematisch dargestellt.

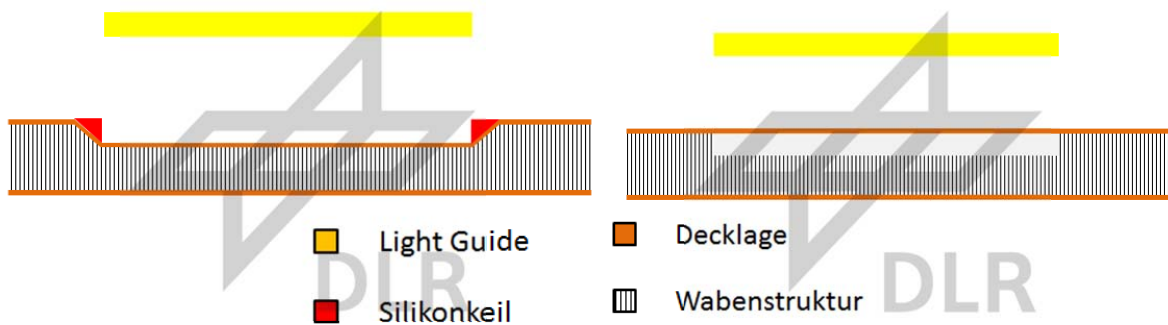


Abb. 42: Integrationsmöglichkeiten des Lightguides

Auf der linken Seite ist ein Konzept gezeigt, bei dem das Sandwich mit leicht erhöhtem Aufwand gefertigt wird und der Lightguide nach der Fertigung eingeklebt wird. Der Aufwand entsteht durch die obere Decklage, welche durch den, mit einer Mulde versehenen Kern, während der Fertigung zwei Umlenkungen erfährt. Dies erfordert eine entsprechende Form, welche extra gefertigt werden muss. Nach dem Fertigen der Decklage wird der Light Guide eingeklebt und die entstehenden Kanten mit Silikon versiegelt. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass der Light Guide keine Beeinflussung durch Harz oder Luftblasen erfährt, welche das Erscheinungsbild trüben könnten. Die Problematik bei dieser Methode ist allerdings das die Fertigung keine echte Funktionsintegration ist, da der Guide nur in eine Mulde eingelegt wird.

Bei der zweiten Möglichkeit wird die Mulde im Vorfeld in den Wabenkern eingelassen. Anschließend wird der Light Guide in dem Kern positioniert und erst danach werden die Decklagen mit der Wabenstruktur verbunden. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass der Light Guide vor äußeren Einflüssen geschützt ist, und die Decklage ungestört über den Guide hinwegläuft. Mechanisch gesehen ist der Guide nur ein lokaler Ersatz des Wabenkerns. Die Stabilität des Sandwiches wird nicht nennenswert vermindert.

Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurde die gerade beschriebene Möglichkeit gefertigt, da sie unter Leichtbau und Stabilitätsaspekten die sinnvollere Methode darstellt.

Abb. 43 zeigt den fertig integrierten Light Guide. An der unteren Kante ist das Alu Profil zu erkennen, in dem die LEDs verbaut sind. Diese strahlen, wie bereits geschrieben, seitlich in den Guide herein. Rundherum ist das Honeycomp zu erkennen.



Abb. 43: Strukturintegrierter Light Guide

In dem Bild ist allerdings auch zu erkennen, dass mehrere Unreinheiten in der Leuchtfläche zu erkennen sind. Diese ist auf das nachträgliche Verkleben der Decklagen zurückzuführen. Bei dieser Methode ist es nicht ausgeschlossen dass sich Luftblasen oder ungleichmäßig verteilte Harzflächen unter der Deckschicht sammeln.

Diese Unreinheiten sind nur sichtbar, wenn man direkt in die Leuchte guckt. In der bestrahlten Fläche ist ein homogenes Leuchtbild zu sehen.

3.3 Lichtintegration - Leuchten Demonstratoren

Für das Work Package 2, der Lichtintegration, wurden zusammen mit der Firma ZCC drei verschiedene Leuchten entwickelt, welche während des Projektes InGa detailliert und umgesetzt werden sollen. Mit allen drei Leuchten sollen verschiedene Techniken oder Innovationen gezeigt werden. Während das Spotlight eine Strahler ist, welcher mit Hilfe eines ICs die Bordspannung von 110 V direkt an die LEDs weitergibt, vereint die Work Deck Leuchte OLED- und LED-Technologie in einem Bauteil. Das Top Panel Accent Light ist eine Leuchte mit LED Kanteneinspeisung bei der die Deckschicht aus GFK besteht, was zu einer erhöhten Festigkeit des Sandwichpanels führt.

3.4 Spot Light

Das Spot Light soll in der Demonstrator Galley insgesamt sechs Mal verbaut werden. Abb. 44 zeigt die Einzelteile der Leuchte. Der Trägerring des Spotlights (türkis) wird in das Sandwich eingeklebt und verkabelt. Anschließend wird der Aufbau mit einem Dekor verblendet.

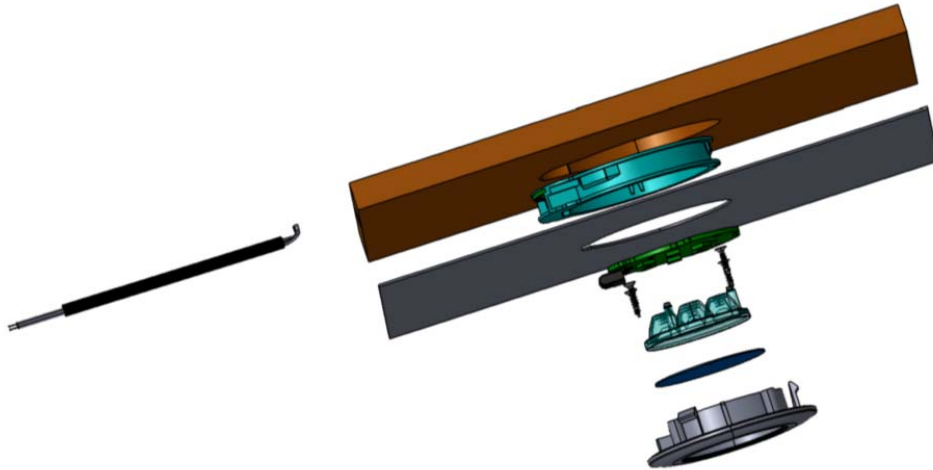


Abb. 44: Explosionsdarstellung Spot Light

Die weitere Elektronik, wie LEDs, Steuerplatine und Linsensystem werden in die Blende der Leuchte montiert und verschraubt. Anschließend kann dieser mit Schnapphaken in den Trägerring eingesetzt werden.

3.4.1 Fertigung

Abb. 45 zeigt die Fertigungsschritte zum Erstellen des Spotlights. Links ist die Tasche welche als Aufnahme für den Trägerring dient zu erkennen. Es wird eine konturgefräste Tasche bis auf die gegenüberliegende Deckschicht erstellt. Hier hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die Deckschicht und den kompletten Kern mit einer Zustellung zu entfernen, da auf diese Weise das Fräsergebnis am besten aussieht.

Nach dem Erstellen der Tasche wird das Sandwichbauteil umgedreht und es wird auf der Rückseite der Kabelkanal eingefräst. Dieser hat eine Breite von sechs Millimetern und ist ebenso tief. Ausgehend von dem ersten Konzept indem der Kanal seitlich in Sandwichebene gebohrt werden soll, hat diese Methode den Vorteil, dass auch Richtungsänderungen in dem Kanal möglich sind. Der Kabelkanal ist anschließend nicht mehr sichtbar.

In Abb. 45 ist die Zuleitung zu dem Trägerring mit einem Geflechschlauch realisiert. Wahlweise lässt sich der Kabelschutz aber auch mit einem pultrudierten Rohr realisieren. In diesem Fall wäre das Kabel nach dem Verkleben des Rohres in den Sandwichkern noch austauschbar.



Abb. 45: Einkleben des Trägerringes

Auf der rechten Seite der Abbildung ist der, in der Tasche positionierte Trägerring abgebildet. Der Ring sitzt aufgrund der auf Untermaß gefrästen Tasche straff in der Aussparung. Es ist kein Spiel mehr vorhanden. Der Geflechtschlauch tritt an der Seite des Sandwichpanels aus. Der Trägerring weist an der Stirnseite eine Bohrung auf. Vergleiche hierzu Abb. 46 links. Durch diese Bohrung kann der Klebstoff (Scotch Weld EC-9300 FST) mithilfe einer Kartusche zwischen Trägerring und Sandwichkern gelangen. Aufgrund seiner thixotropen Eigenschaften ist die Viskosität des Klebstoffes gering genug um den halben Umfang um den Trägerring zu fließen und an den gegenüberliegenden Stellen wieder auszutreten. In Abb. 46 ist auf der rechten Seite zu erkennen, wo der Klebstoff eingeführt wurde (rechts) und wo er aus dem System wieder ausgetreten ist (links).



Abb. 46: Verklebevorgang Trägerring

Nachdem der Klebstoff appliziert ist, lässt sich die Verklebegüte auf der Rückseite des Panels anhand der gefüllten Waben beurteilen. Siehe hierzu Abb. 47. Der Klebstoff legt sich rund um den Trägerring zwischen Wabe und Kunststoff.



Abb. 47: Mit Klebstoff gefüllte Wabenstruktur

Neben den geplanten Austrittsstellen ist allerdings auch zu erkennen, dass der Klebstoff auf der Unterseite zwischen Trägerring und Deckschicht ausgetreten ist. Diese Leckage ist nicht zu vermeiden. Der Klebstoff lässt sich gut mit einem Tuch entfernen. Es muss lediglich darauf geachtet werden, dass die Kontaktstellen nicht mit dem Scotch Weld kontaminiert werden.

Nach dem Verkleben des Trägerringes kann die dünne Dekorfolie appliziert werden. Diese Folie kaschiert den Trägerring komplett und hat nur einen Ausschnitt für die Blende. Die Dekorfolie wird für jeden Kunden individuell angepasst und wird farblich auf das Interieur des Flugzeuges abgestimmt.

Abb. 48 zeigt den Spotlight Demonstrator mit bereits montierter Blende.



Abb. 48: Fertiger Spotlight Demonstrator

3.4.2 Integration in Demonstrator

Die Integration der Spotlights in den realen Panels erfolgt wie in 3.4.1. Lediglich die Dimensionen der Panels sind größer. Die Spotlights werden direkt unter den Hängeschränken der Galley positioniert. Die Panels in die die Spotlights integriert werden dienen gleichzeitig als Boden der Hängeschränke.

Abweichend zu dem Kabelkanal aus Kapitel 3.4.1. wird die Aussparung für die Kabel in die Rückwand gefräßt und anschließend mit Klebstoff verfüllt. In Abb. 49 ist die Nut mit blauem Klebeband maskiert worden um überflüssigen Klebstoff von dem Panel fern zu halten.



Abb. 49: Klebstoffverfüllter Kabelkanal inklusive der benötigten Maskierung

Nach dem Aushärten des Klebstoffes wurde die Maskierung entfernt und die Panels an die Firma Schütz versendet um diese dort in die Galley zu integrieren.

3.5 Area Work Light

Das Area Work Light ist eine Arbeitsplatzbeleuchtung welche aus LEDs und OLEDs besteht. In der CAD Skizze in Abb. 50 sind die Leuchtmittel in blau dargestellt. Links und rechts sind die beiden OLEDs positioniert. In der Mitte befindet sich ein Lightguide welcher mithilfe eines LED Streifens von der Seite beleuchtet wird.

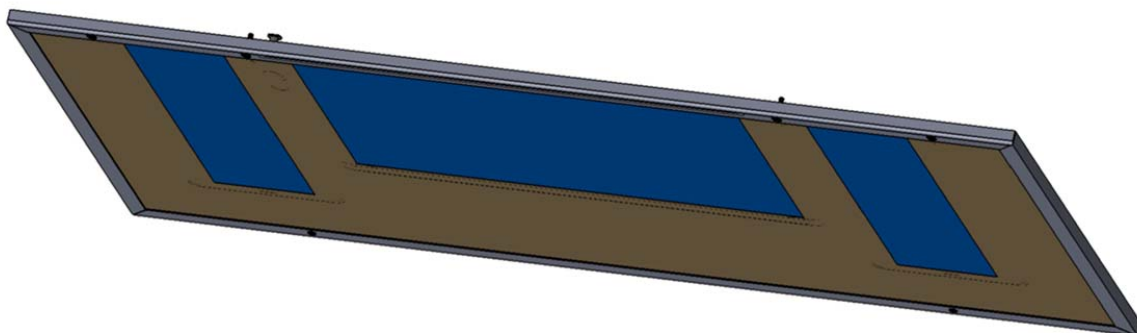


Abb. 50: Area Work Light

Die komplette Verkabelung der Leuchtmittel befindet sich in der Stirnseite des Randprofils. Nach der Demontage dieses Profils sind alle Leuchtmittel zugänglich und bei Bedarf austauschbar. Abb. 51 zeigt den schematischen Querschnitt des Work Lights. Ausgehend von einem Standard Sandwichpanels werden für jedes Leuchtmittel zwei unterschiedlich tiefe Taschen eingefräst. In diese Taschen wird ein vorher abgekantetes Trägerblech eingeklebt. Mit Hilfe dieses Blechbauteiles werden die Leuchtmittel positioniert. Geschützt wird der komplette Aufbau mit einer sogenannten Gorillaglasscheibe, welche flächig über das komplette Panel verklebt wird.

3.5.1 Fertigung

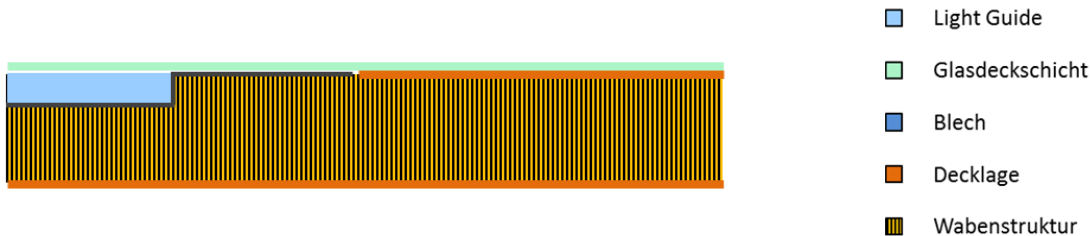


Abb. 51: Querschnitt durch das Panel

Die Trägerbleche, die Elektronik sowie das Gorillaglas werden von der Firma ZCC für den Prototypenbau zur Verfügung gestellt. Um die benötigten Parameter der Portalfräsanlage zu bestimmen, wurden einige Probefräsungen an dem Sandwichwerkstoff durchgeführt und eine zwei Millimeter Makrolon Platte eingesetzt. Die Platte schießt eben mit der Deckschicht des Sandwichpanels ab. Das Ergebnis ist nachfolgend dargestellt.

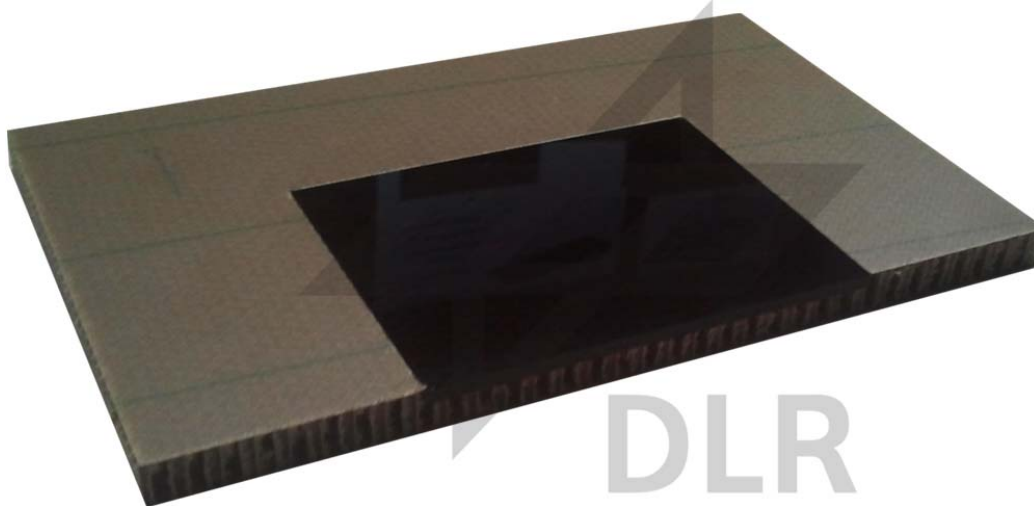


Abb. 52: Probefräsung für Area Work Light

3.5.2 Integration in Demonstrator

Die Fertigung des Panels beginnt mit dem 10 mm starken Honeycomp Sandwich „616 HC“ welches von der Firma Schütz zur Verfügung gestellt wird. Dies ist das Basismaterial aus dem auch der Rest der Galley gefertigt wird.

Sämtliche Arbeiten an dem Panel werden auf einer CNC Fräse durchgeführt. Nachdem die Kontur der Leuchte gefräst ist werden die Taschen in die Oberfläche eingebracht. Hierfür nimmt der Fräser 2,6 mm für die Tasche der OLEDs, beziehungsweise 3,3 mm für die Tasche des Lightguides in einem Zug weg. Rundum weisen die Taschen noch einen Kragen auf. Dieser Kragen ist so tief, wie das eingeklebte Aluminiumblech dick ist. Nach dem Verkleben der Bleche ist dieser Teil der Tasche wieder auf dem gleichen Niveau wie die Originaldeckschicht des Panels.

Abb. 53 zeigt den Fräsvorgang des Panels. Sowohl die Kontur als auch schon die erste Tasche der OLED wurden in das Panel eingebracht. Die Tasche für den Lightguide wird gerade erstellt.



Abb. 53: Fräsvorgang des Area Work Light

Abb. 54 zeigt das fertig bearbeitete Panel. Neben den bereits erwähnten Taschen wurden noch Bohrungen für die Befestigung, sowie einige Kabelkanäle für die Elektronik eingebracht.

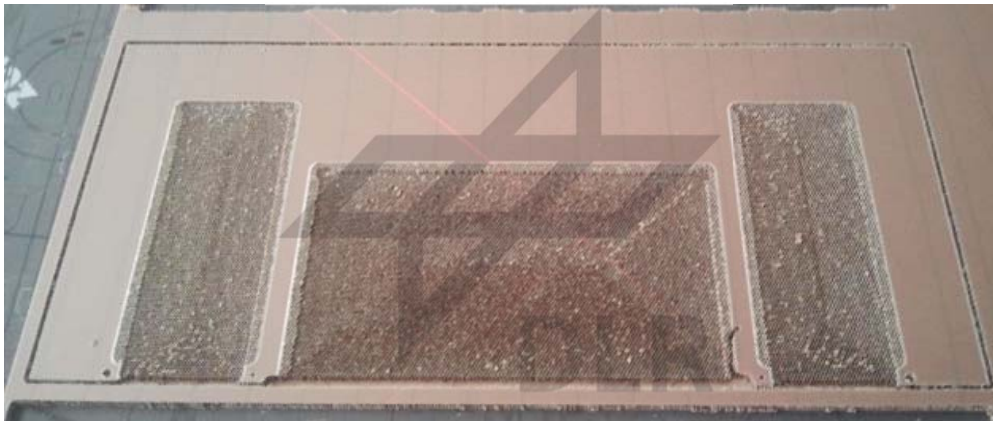


Abb. 54: erstellte Taschen in dem Panel des Area Work Light

Nach dem Fräsvorgang wird das Panel gereinigt um eventuelle Verunreinigungen und vorhandene Späne zu entfernen. Anschließend werden die 0,8 mm starken Aluminium Bleche in die zuvor erstellten Taschen eingeklebt. Vergleiche hierzu Abb. 55.



Abb. 55: Verklebte Aluminiumleitbleche

Der Klebstoff Scotch Weld EC-9300 FST welcher standardmäßig bei der Firma Schütz verwendet wird, wird flächig auf die Rückseite der Aluminiumbleche aufgetragen. Anschließend werden die Blech mit dem Panel verpresst. Nach 24 Stunden ist das Bauteil für die Weiterverarbeitung wieder nutzbar.

Der nächste Schritt besteht darin, die Glasdeckschicht auf das Panel aufzubringen. Hierfür wurde ein Hartglas von der Firma Schott verwendet. Dieses Glas wurde per Siebdruckverfahren bereits fertig maskiert geliefert. Mithilfe dieses Siebdruckverfahrens wurde die Glasplatte lackiert um das Honeycomp-Panel zu kaschieren. Lediglich an den Bereichen der Leuchten wurden die transparenten Eigenschaften gelassen.

Zum Verkleben der Glasplatte wurde wiederum der Klebstoff EC-9300 FST verwendet. Dieser wurde flächig auf die Glasscheibe aufgebracht und mithilfe eines Zahnspachtels verteilt. Um zu verhindern, dass kein Klebstoff in den Leuchtenbereich gelangt, wird der Rand der Leuchtflächen mit einem 10 mm breiten Klebeband maskiert. Das Klebeband wird vor dem endgültigen Verkleben entfernt. In Abb. 56 ist das blaue Klebeband zu erkennen. Der braune Scotch Weld Klebstoff ist in den Bereichen außerhalb der transparenten Flächen.



Abb. 56: Maskieren der Glasdeckschicht

Die Nahaufnahme in Abb. 57 zeigt das Hartglas nachdem das blaue Maskier-Klebeband entfernt wurde. Zwischen dem Klebstoff (braun) und den transparenten Leuchtflächen scheint die schwarze Farbe der Siebdruckoberfläche durch.



Abb. 57: Aufgetragener Klebstoff auf der Glasdeckschicht

In Abb. 58 ist das fertige Area Work Light zu sehen, so wie es in der Galley verbaut wird. Die schwarze Siebdruckmaskierung wurde nur auf der rechten Seite aufgebracht, um die Fertigungstechnologie an dem Demonstrator zeigen zu können.



Abb. 58: Fertiges Area Work Light

Auf der rechten Hälfte der Leuchte ist das Produkt zu sehen, wie es der Kunde im späteren Einsatzfall kaufen und sehen würde. Es sind lediglich die Leuchten hinter dem schwarz lackierten Glas zu erkennen. Die schwarze Farbe erhöht zusätzlich den Leuchtkontrast der gesamten Lampe.

Auf der linken Seite des Panels ist das Hartglas ohne die schwarze Maskierung zu erkennen. Dies hat zur Folge, dass die Klebeflächen und die Kragen der Bleche zu erkennen sind. Dem interessierten Kunden kann anhand dieses Ausschnittes die Funktionsweise und die Fertigung der Lampe nähergebracht werden.

Die Leuchtmittel fehlen in dieser Abbildung noch, da sie erst kurz vor der Montage bei der Firma ZCC eingesetzt und verkabelt werden.

3.6 Top Panel Accent Light

Das Top Panel Accent Light (TPAL) besteht aus einem LED Streifen der von der Seite in einen Lightguide einstrahlt. Dieser Lightguide besteht aus einer Macrolonplatte welche mit einem diffusen Muster versehen wurde. Rückseitig auf der Platte ist eine Reflektorfolie eingebracht, welche das Licht gebündelt durch die Deckschicht leiten soll. Der Lightguide wird direkt zwischen Deckschicht und Wabenkern eingebracht. Eingefasst wird der ganze Aufbau von einem Randabschlussprofil aus Aluminium.

In Abb. 59 ist der Aufbau des Top Panel Accent Light schematisch dargestellt.

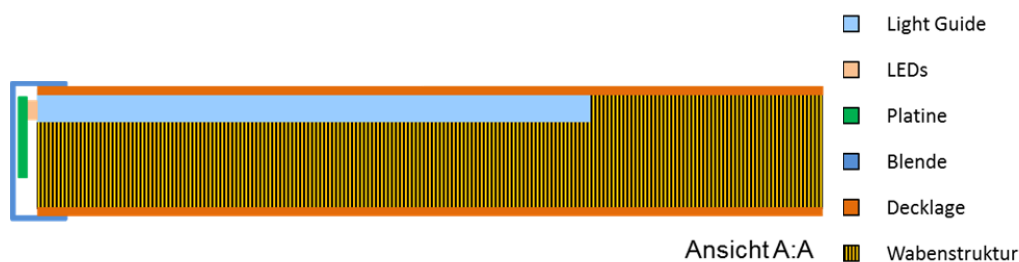


Abb. 59: Schematische Darstellung des TPAL

Der Lightguide ist in den Wabenkern eingelassen, welcher oben und unten mit der Deckschicht abschließt. Auf der linken Seite ist die Platine (grün) mit den LEDs (gelb) dargestellt, welche durch die Blende an der richtigen Position gehalten wird.

3.6.1 Fertigung

Der Lightguide soll nach dem Fertigungsprozess als Einschubmodul in das Bauteil eingeführt werden.

Um eine möglichst fertigungsnahe Produktion zu realisieren, wird der Sandwichkern mit dem entsprechenden Ausschnitt versehen und die Deckschichten direkt auf dem Kern in der Presse ausgehärtet.

Um zu verhindern, dass die Deckschichten über dem Ausschnitt des Kernes einknicken, muss ein Lightguide-Dummy eingelegt werden welcher den Hohlraum offen hält und den Temperaturzyklus übersteht.

Für diesen Zweck wurden zwei Aluminiumbleche mit einer Wandstärke von je 2 mm in Trennfolie eingepackt und als Abstandshalter in die Tasche eingelegt.

In Abb. 60 ist der Fertigungsprozess von links nach rechts dargestellt. Auf der linken Seite ist der Wabenkern mit der eingebrachten Tasche abgebildet.

Mittig sind die Aluminiumbleche, welche bereits in die Tasche eingelegt sind, umgeben von der blauen Trennfolie abgebildet.



Abb. 60: Schrittweiser Aufbau des TPAL

Auf der rechten Seite ist die Glasfaserdeckschicht aufgebracht. Im hinteren Teil des Panels schließt sie an die Wabe an, während die Glasfaserschicht im vorderen Bereich des Panels, bedingt durch die Trennfolie, keine Verbindung zu der Struktur herstellen kann.

In Abb. 61 ist auf der linken Seite das fertige Bauteil abgebildet, wie es nach dem Aushärtprozess mit dem entfernten Dummymaterial aussieht. Es sind deutliche Lufteinschlüsse in der Deckschicht zu erkennen. Lediglich in den Randbereichen ist die Wabenstruktur unterhalb der Deckschicht zu erkennen. Der Rest der Glasfaserschicht ist durch die kleinen Lufteinschlüsse unregelmäßig diffus geworden.



Abb. 61: Ergebnis des Ausgehärteten TPAL Panels

Auf der rechten Seite der Abb. 61 ist zu erkennen, dass das Top Panel Accent Light ohne das Leuchtmodul und die Abschlusskante nicht stabil ist. Die Deckschicht lässt sich nach Belieben verbiegen.

Es ist jedoch zu erwarten, dass der Lightguide und das Abschlussprofil die nötige Stabilität bringen, um eine ansprechende Leuchte zu erzeugen.

3.6.2 Integration in Demonstrator

Insgesamt wurden fünf einzelne Module gefertigt wie sie in Kapitel 3.6.1 beschrieben wurden. Die einzelnen Module wurden seitlich aneinander gereiht und mit einem Aluminiumprofil zu einer Einheit verbunden. Dieses Modul wurde anschließend an der Galley, oberhalb der Schränke befestigt. Nachfolgend ist das zusammengefasste Modul dargestellt.



Abb. 62: Fertig montiertes TPAL an der Galley

3.7 Demonstrator Galley

Nachfolgend, in Abb. 63, ist die gesamte Galley mit eingeschaltetem Licht dargestellt. Im oberen Bereich leuchtet das Top Panel Accent Light in blau. Knapp darunter sind die sechs Spotlights, direkt unter den Hängeschränken, angeordnet.



Abb. 63: Fertige Demonstrator Galley

Unterhalb der drei Wasserkocher und dem bistabilen Display sind die drei Leuchtflächen des Work Lights zu sehen.

4 Eingehende Darstellung – AP2 – Gewichtsreduzierte Panel

4.1 Motivation

Der Flugzeughersteller Fa. SELL GmbH nutzt zur Darstellung der Tragenden Struktur von Flugzeugküchen (sog. „Galleys“) eine Struktur aus Sandwichplatten, siehe Abb. 3 und Abb. 4. Die Sandwichplatten bestehen aus Glasfaserverbunddeckschichten mit Aramidwabenkernen). Die zahlreichen Vorteile der Sandwichbauweise wurden bereits im Halbjahresbericht 2013/1 erläutert, siehe Dokument „INGA-RP-2013-08-01-JWo-000318-INGA_Halbjahresbericht_HJ1_2013-v10.pdf).

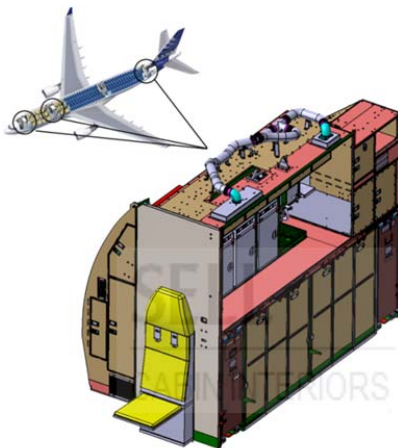


Abb. 64: Positionen von Flugzeugküchen in einem Passagierflugzeug A330.

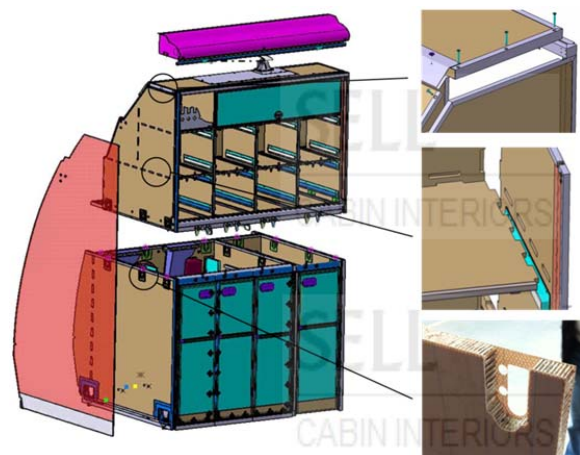


Abb. 65: Aufbau einer Flugzeugküche aus Sandwichelementen.

Ziel des Arbeitspakets WP1 AP2, „Gewichtsreduziertes Panel“ ist die Optimierung dieser tragenden Sandwichstruktur. Der Erstfokus, die Gewichtsoptimierung der Sandwichplatten an sich durch eine Geometrie- und Materialoptimierung wurde auf die Verbindungsstellen verlagert. Dies geschah aus zwei Gründen:

1. Als Sandwichmaterial werden Platten der Standards „616 HC“ sowie „618 HC“ (Spezifikation siehe Abschnitt 2.3.1, ab Seite 71) eingesetzt. Diese stellen bereits bzgl. Materialauswahl und mechanischer Leistungsfähigkeit einen guten Kompromiss dar und haben sich seit Jahrzehnten im Luftfahrtbetrieb bewährt. Eine Umstellung auf neue Geometrien und oder Materialien würden eine komplette Umgestaltung der automatisierten und manuellen Fertigung, der Zertifizierung u. a. bedingen. Daher wurde der Bitte der Fa. SELL GmbH entsprochen und die Arbeiten im Projekt InGa im WP1, AP2, „Gewichtsreduziertes Panel“ weg von einer weiteren Optimierung des Sandwichhalbzeugs hin zur Optimierung der Verbindungstechnik gelegt. In diesen Strukturbereichen besteht ein großes Optimierungspotential, sie sind daher ein Interessenschwerpunkt der Fa. SELL GmbH.
2. Ziel mehrerer Arbeitspakete des Projekts InGa ist es, zukünftig die Kernbereiche der Sandwichpaneele für eine Integration von funktionellen Elementen zu nutzen. So sollen Verkabelung und Beleuchtungselemente in spezielle Sandwichelemente integriert werden. Für Wartung, Reparatur und Recycling ist jedoch eine gute Zugänglichkeit bzw. Austauschbarkeit der funktionsintegralen Sandwichelemente erforderlich. Dies bedingt ein Wechsel von unlösbaren zu separierten Verbindungsstellen zwischen den Sandwichelementen der Küchenstruktur, die in der Sandwichbauweise durch Insertverbindungen dargestellt werden.

Der Nachteil aktueller Insertverbindungen liegt in einem hohen Gewicht im Vergleich zu den unlösbaren (Klebe-)Verbindungen. Hieraus ergibt sich die Aufgabe einer Form- und Gestaltoptimierung von aktuellen Insertverbindungen.

4.1.1 Sandwichprinzip

In der Sandwichbauweise werden zwei Leichtbauprinzipien vereint, die folgend erläutert werden.

4.1.1.1 Prinzip des spannungsgerechten Materialeinsatzes

Zum Verständnis der Sandwich- bzw. Kernverbundbauweise kann die Verteilung der Biegespannung in einem Kragbalken betrachtet werden. Bei einem monolithischen¹ Kragbalken hoher Streckung kann der Schubeffluss vernachlässigt und damit mit dem mechanischen Modell des sog. „Bernoulli-Balkens“ beschrieben werden. Bei diesem nehmen Zug- und Druckspannung linear von der Ober- und Unterseite zur Mitte hin ab und werden dort (in der sog. „neutralen Faser“) zu Null, siehe Abb. 3, links. Reduziert man nun in Bereichen mit geringer Spannung das Material, erhält man ein Querschnittsprofil in Sanduhrform als formideale Lösung, siehe Abb. 3, Mitte. Diesem Leichtbauprofil kommt der technisch relevante I-Träger als Kompromiss aus Form und geringem Herstellungsaufwand sehr nahe, siehe Abb. 3, rechts.

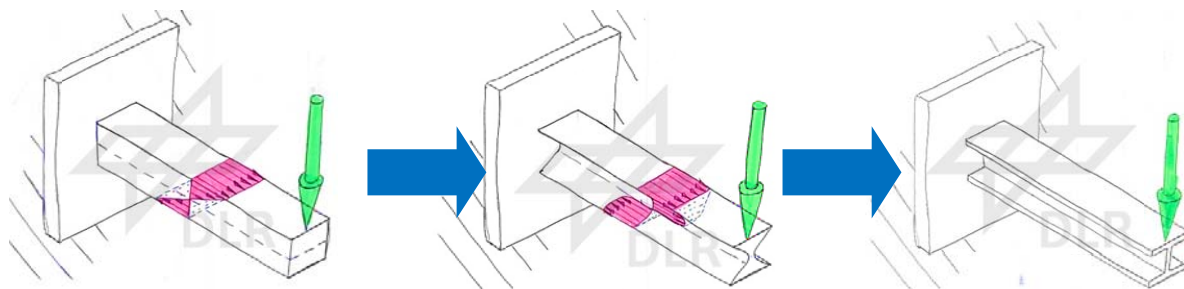


Abb. 66: Formentwicklung des Querschnitts eines Kragbalkens nach dem Prinzip der lastgerechten Materialanordnung.

4.1.1.2 Prinzip der Kombination beanspruchungsgerechter Materialien

Durch Ersetzen des Stegs des I-Trägers durch ein vergleichsweise weiches Material geringer Dichte werden die Biegespannungen fast ausschließlich in den Deckschichten des Balkens als hohe Zug- bzw. Druckspannungen konzentriert, das Kernmaterial überträgt nur noch die Schub- und Druckspannungen zwischen den Deckschichten, siehe Abb. 4 und Abb. 5.

Als Materialien für die Deckschichten eignen sich hochfeste Stähle oder Faserverbundwerkstoffe auf Grund ihrer überragenden Zugfestigkeiten. Für den Kern eignen sich Werkstoffe, die bei geringer Dichte eine hohe Druck- und Schubfestigkeit aufweisen. Zur Verwendung kommen hier Kunststoffschäume mit Zellstrukturen bzw. degradierter Dichte oder Wabenmaterial, das sich durch eine Diskretisierung des Materials in hexagonaler Wabenform auszeichnet. Als Wabenwerkstoffe werden Leichtmetalle oder matrixgetränkte Papiere eingesetzt.

Soll eine monolithische Struktur durch eine Sandwichstruktur gleicher Steifigkeit ersetzt werden, muss bei der Sandwichbauweise der teure Hochleistungswerkstoff nur zur Darstellung der Deckschichten in geringerer Materialstärke eingesetzt werden, sodass mit der Sandwichbauweise Materialkosten reduziert werden können, vgl. Abb. 6.

¹ Monolithisch: aus einem einzigen Werkstoff bestehend.

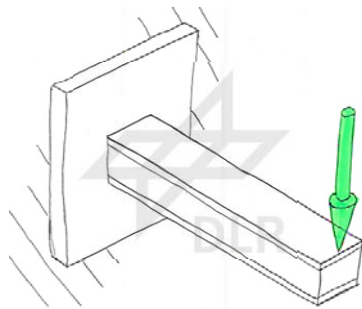


Abb. 67: Ersetzen des Stags durch ein Material mit geringer Dichte.

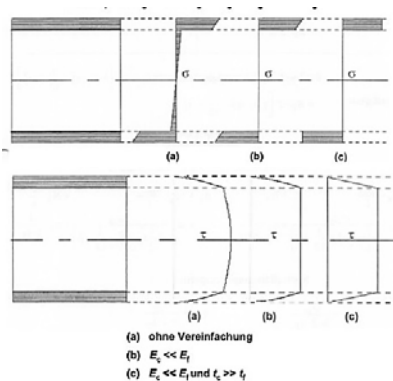


Abb. 68: Vereinfachung der Normal- und Schubspannungsverteilung im Sandwichbalken (2).




	Solid Material	Core Thickness t	Core Thickness $3t$
			
Stiffness	1.0	7.0	37.0
Flexural Strength	1.0	3.5	9.2
Weight	1.0	1.03	1.06

Abb. 69: Steifigkeitszugewinn durch Erhöhung des Abstands der Deckschichten bei gleichem Gewicht (3).

Trotz vielfältiger Beispiele für Einzelanwendungen hat sich die Sandwichbauweise nach wie vor nicht im Großserienbau von Flug- und Fahrzeugen durchgesetzt. Dies liegt einerseits am komplexen Schädigungs- und Versagensverhalten, da aus der Beteiligung von unterschiedlichen Werkstoffen unterschiedlichste Schädigungen wie Knittern, Beulen, Kernzerdrücken (sog. Brazier-Effekt), Deckschichtabreißen sowie Langzeiteffekte wie Materialdegradationen oder das Eindringen von Feuchtigkeit resultieren können. Herausforderungen bestehen weiterhin in der Darstellung einer hinreichenden Anbindung zwischen Deckschichten und Kern sowie in der Verbindung von Sandwichelementen untereinander oder zu anderen Elementen.

Andererseits erfordern Verbindungen von Sandwichpaneelen untereinander sowie Ein- und Ausleitung von Kräften einen hohen Auslegungs- und Fertigungsaufwand.

1.1.1. Verbindungsarten von Sandwichhautfeldkonstruktionen

Besonders in der Flugzeug- und Fahrzeugtechnik ergibt sich für die Sandwichverbindungstechnik ein großes Lasten- und Anforderungsspektrum. Die Randbedingungen reichen von der Übertragung der mechanischen Lasten über LifeCycle Anforderungen (Herstellung, Fertigung, Montage, Betrieb, Demontage, Recycling) bis zu chemischen und klimatischen Belastungen.

Die zu untersuchenden Flugzeuggalleys in Kernverbundbauweise weisen durch die große Anzahl an Seitenwänden und Böden viele Sandwichverbindungsstellen und -krafteinleitungen auf.

Nicht mehr lösbare Verbindungen

Im Hinblick der in Abschnitt 1.1.1, Seite 57 beschriebenen mechanischen Wirkungsweise des Sandwichprinzips ist es wichtig, die Biegebelastungen ausschließlich in den beiden Deckschichten als Zug- und Druckkräfte aus- und einzuleiten und im Anbindungsbereich beide Deckschichten gleichermaßen mit in den Lasteingriff zu nehmen.

In der Sandwichtechnik sind zur Darstellung von nicht mehr lösbaren Verbindungen von Strukturen in der Schalenbauweise (vgl. auch Abschnitt 4.1.1) strukturelle Hartverklebungen wie auch elastische Montageverklebungen mit und ohne zusätzlichen Stütz- sowie Randprofilen zu finden, siehe Abb. 7.

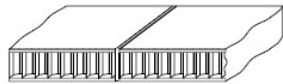

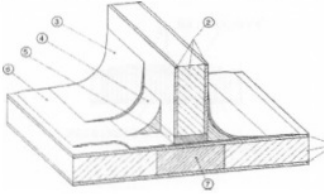
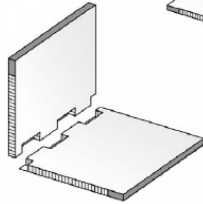
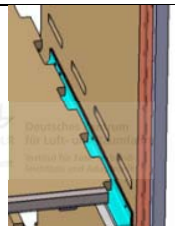
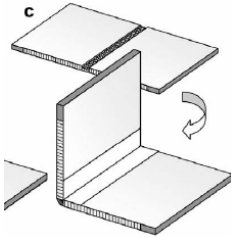
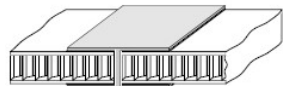
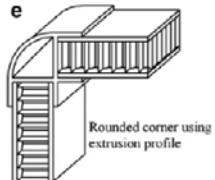
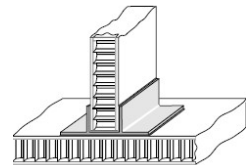
Butted sandwich joints (partly reinforced)			
Mortise and - tenon (or tongue and groove)	/		
Cut and fold	/		/
With additional profil material			
	Beispiele nicht lösbarer Stoßverbindungen (4)	Beispiel nicht lösbarer L-Verbindungen (5)	Beispiele nicht mehr lösbarer T- und Kreuzverbindungen (4)

Abb. 70: Beispiele für nicht mehr lösbare Sandwichverbindungen, (4), (2), (6), (7).

Demontierbare Verbindungen

Zur Darstellung demontierbarer bzw. lösbarer Sandwichverbindungen von Strukturen in der Schalenbauweise (vgl. Abschnitt 4.1.1) sind Schraubverbindungen mit und ohne Stützelemente sowie Randprofile zu finden, wobei die Schrauben meist zur Aufnahme der nötigen Klemmkraft wie auch zur lokalen Lastverteilung in sog. „Inserts“ eingesteckt oder -geschraubt werden, siehe Abb. 8.

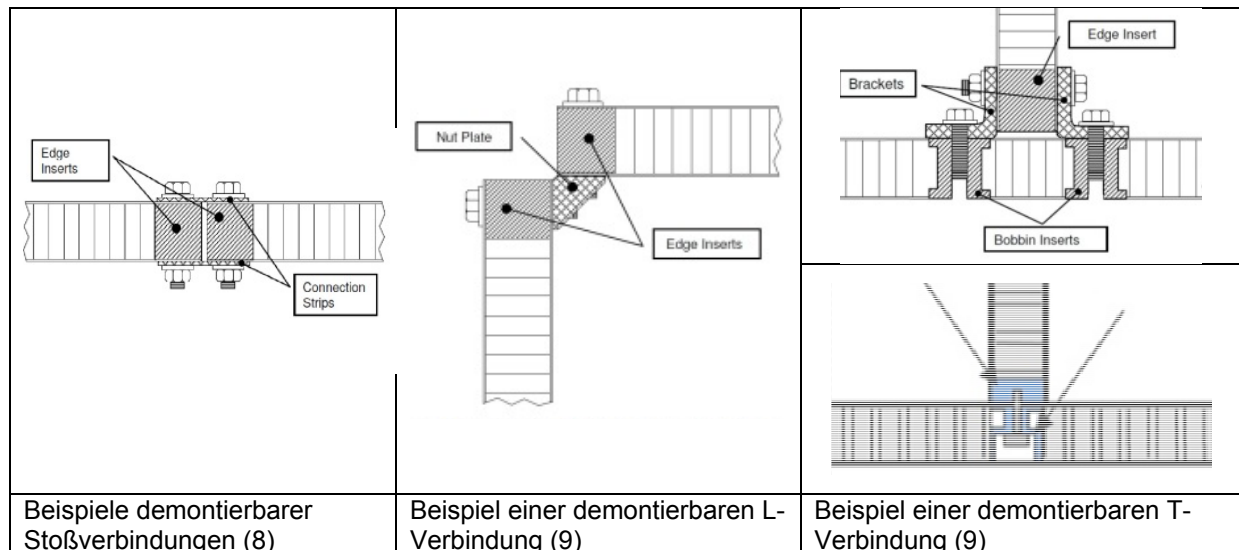


Abb. 71: Beispiele für demontierbare Sandwich-Sandwichverbindungen

4.1.2 Mechanische Funktionen von lokalen Lasteinleitungen in Sandwichelementen

Aufgrund der geringen Druckfestigkeit des Kerns als auch der geringen Biegesteifigkeit der Deckschichten (zumindest bei Sandwichtypen mit dünnen Deckschichten, wie sie im Projekt InGa genutzt werden) ist die lokale Lastaufnahmefähigkeit in der Fläche stark begrenzt. Die im Projekt InGa genutzten Sandwichtypen 616 HC sowie 618 HC können dabei weder hinreichende Schraubenklemmkraft noch strukturelle Lasten aufnehmen ohne geschädigt zu werden (Abb. 9), (Abb. 10). Dies bedeutet auch, dass derartige Direktlasteinleitungen die Festigkeit einer Sandwichstruktur stark reduzieren bzw. für Schäden der Struktur sorgen, lange bevor die Sandwichelemente selber an ihre Belastungsgrenzen stoßen (10) (S. 762), (11) (S. 618).

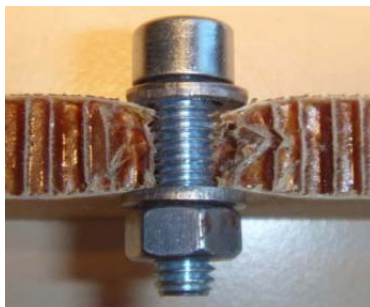


Abb. 72: Versagen des Kernmaterials bereits durch die Schraubenklemmkraft.


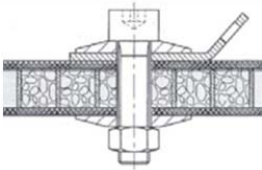
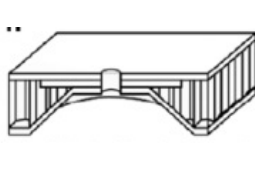
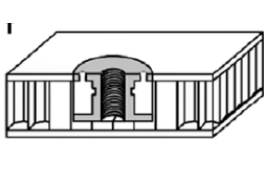
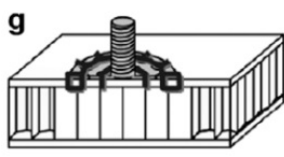
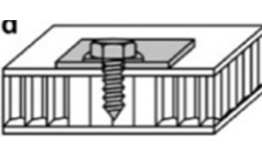
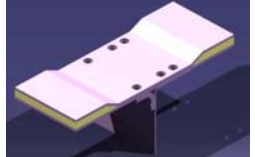
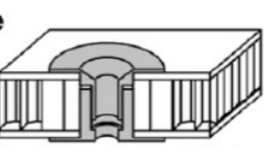


Abb. 73: Lokale Schädigung des Sandwichelements durch die lokale, ungestützte Einleitung von strukturellen Lasten (Schraube unter Biegemoment, Sandwich unter Drucklast) (12).



4.1.3 Insertkörper für lokale lösbare Verbindungen in Sandwichtragwerken

Um sowohl die Schraubenklemmkraft zu ertragen als auch strukturelle Lasten unbeschädigt ertragen zu können, muss das Sandwich im Bereich der Lasteinleitung lokal abgestützt werden. Stand der Technik sind Lasteinleitungselemente, die stark unterschiedliche Gestaltungsweisen aufweisen, die auf unterschiedlichen mechanischen Prinzipien beruhen, Tab. 3.

			
			
Verbindung mit einer Deckschicht: Onsert.	Lokale Verstärkung des Kerns durch Ausfüllen der Waben mit Vergussmasse ("Potting").	Zusammenziehen der Deckschichten im Lasteinleitungsbereich (JFS = "joint face sheets").	Kernverstärkung durch sog. Insertelemente (oben: „Verlorenes“ Insert, unten: „Durchgehendes“ Insert).

Tab. 6: Typische Gestaltungsweisen lokaler Lasteinleitungen in der Fläche von Sandwichelementen (2), (7).

Anforderungen an lokale Lasteinleitungen in Sandwichelementen:

- Die Lasteinleitungselemente müssen einfach, schnell und eindeutig (nur in einer Position zueinander passend) installierbar sein.
- Die Lasteinleitungselemente müssen eine einfache Montage der Gesamtverbindung gewährleisten und dabei ggf. einen radialen Toleranzausgleich in der Flächenebene gewährleisten.

Im Folgenden werden ausschließlich lokale Lasteinleitungen mit Insertelementen betrachtet.

4.1.4 Die Komponenten einer separierbaren Insertlasteinleitung

Zur Übersicht werden im Folgenden die unterschiedlichen Bestandteile einer Insertverbindung genannt und deren Aufgaben beschrieben. Die Bestandteile und Aufgaben können je nach Inserttyp variieren. Die Beschreibung erfolgt für einen häufig verwendeten Standardinserttyp, ein durchgehendes Insert in Diaboloform, Typ „NAS 1834A3-394“, der den aktuellen Stand der Technik darstellt, Abb. 11.

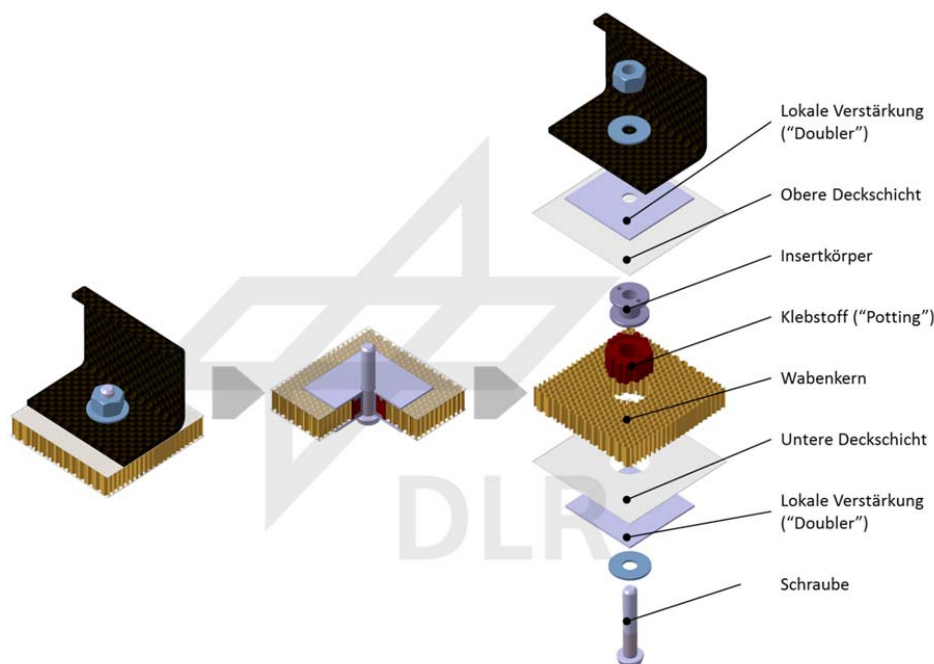


Abb. 74: Einzelbestandteile einer typischen Insertverbindung.

4.1.5 Insertkörper

Der Insertkörper nimmt die von der Schraube eingeleiteten Kräfte auf und leitet diese teilweise weiter.

Die Klemmkraft der Schraube wird im Insert selber als innere Kraft als Druckspannung aufgenommen, das Insert wirkt als Spannhülse.

Zug-, Druck-, Schubkräfte sowie Torsions- und Biegemomente, die durch die Schraube eingeleitet werden, werden vom Insert jedoch an den umgebenden Klebstoff sowie an die Deckschichten weitergegeben.

Einen Sonderfall stellt die Lochleibungsabstützung als weiteren Lastpfad dar, dieser Mechanismus wird jedoch nur bei vergleichsweise dicken Deckschichten wirksam, was für die im Projekt InGa verwendeten Sandwichtypen jedoch unzutreffend ist.

Die Formgebung und damit die Steifigkeitsverteilung des Inserts ist ausschlaggebend sowohl für die Verteilung der Lasten an die Verbindungsbereiche als auch die Spannungsverteilung in den Verbindungsbereichen selber. Ziel im Projekt InGa ist es daher, einen Beitrag zur Optimierung der Formgebung für eine optimale Verteilung der Spannungen in den Kontaktbereichen zu leisten.

4.1.5.1 Verschraubung

Die Schraube dient zur Fixierung des Lastelements mit dem Sandwichelement. Gleichzeitig ist sie das lösbare Element der Verbindung, mit ihrer Hilfe kann die Verbindung für z. B. Reparatur, Wartung und Recycling separiert werden. Die Schraube stellt das mit Abstand schwerste und steifste Element in der Verbindung dar und bietet daher ein hohes Optimierungspotential für Gewichtseinsparung.

Die Schraube überträgt äußere Zuglasten auf die Insertverbindung.

Die Schraube sorgt für eine reibschlüssige Verbindung zwischen dem anzuschraubenden Strukturelement und der Sandwichdeckschicht. Die nötige Klemmkraft der Schraube muss als innere Druckkraft vom Insertkörper als zweitsteifstes Element in der Insertverbindung aufgenommen werden. Damit wird die Schraube selber auf Zug, nicht wie ein Nietbolzen in einer Nietverbindung auf Scherung belastet.

Bei Insertkonzepten mit geringer Schraubenklemmkraft leitet die Schraube hingegen auch die Schubkräfte sowie einen Teil der Biegemomente ein.

4.1.5.2 Klebstoff

Der Klebstoff im Sandwichkern zwischen Insertkörper und Kernwabenmaterial dient zur Fixierung des Inserts im Kern, er überträgt bei einer Zug- oder Druckbelastung der Insertverbindung als Kernlastpfad deckschichtnormalen Schub an die Kernwaben.










Der Klebstoff zwischen den Deckschichtverstärkungen (im Projekt oft mit „Doubler“ bezeichnet) und den Sandwichdeckschichten wird durch die Klemmkraft der Schraube deckschichtnormal auf Druck sowie durch äußere, deckschichtparallele Lasten auf Scherung belastet. Der Klebstoff verhindert dabei das Abgleiten der Doubler von den Deckschichten.

4.1.5.3 Deckschichtverstärkungen bzw. Doubler

Die lokalen Deckschichtverstärkungen dienen zur Lastverteilung bzw. der Homogenisierung der Steifigkeitsabnahme vom Insertkörper zum Sandwichelement. Sie steifen die Deckschichten im Insertbereich aus und reduzieren die Deckschichtverformung, die im Zuglastfall zur Ablösung der Deckschichten vom Wabenkern führt.

4.1.5.4 Klassifizierung von Insertlasteinleitungen

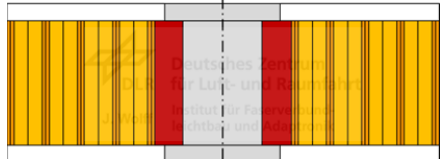
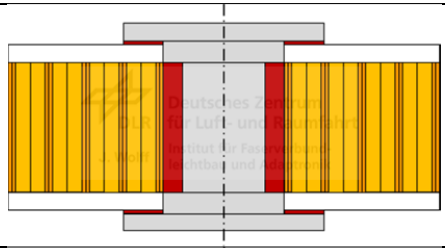
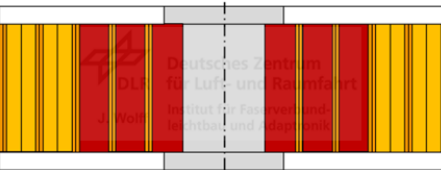
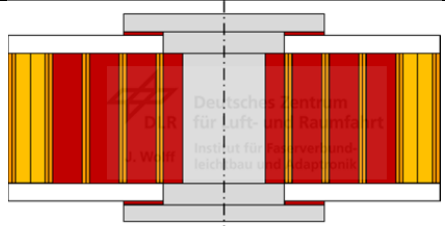
Eine Unterscheidung von Inserttypen kann zunächst nach der Ausdehnung des Inserts im Kern vorgenommen werden. Teilvergossene und voll vergossene Insertkörper, die nicht mit beiden Deckschichten in Berührung stehen, werden als „verlorene“ Inserts bezeichnet (engl.: „blind“ oder „partial“). Inserts, die mit beiden Deckschichten in direkter Berührung stehen, werden als „durchgehende“ Inserts bezeichnet (engl.: „through-the-thickness“), Tab. 2.

		Eindringtiefe des Inserts und der Vergussmasse im Sandwichkern (Indentation depth of insert and potting compound in sandwich core)		
		teilvergossen (partial potted)	voll vergossen (fully potted)	durchgehend (through-the-thickness)
Flansch- position bzgl. Deck- schicht (Flange and position regarding the face sheets)	flächig verklebter Flansch, innen (plane bonded flange, inner side)			
	stirnseitig verklebter Flansch, innen (flush, bearing bonded flange)			
	erhabener, flächig verklebter Flansch (protruding, plane bonded flange)			

Tab. 7: Kategorisierung von Inserttypen abhängig von der Ausdehnung im Sandwichkern.

Der größte Vorteil verlorener Inserts ist, dass eine der beiden Deckschicht nicht beschädigt (nicht durchbohrt) wird, was im Hinblick auf aerodynamisch wirksame Oberflächen oder aus optischen Gründen oft eine Pflichtanforderung ist. Nachteil ist die mechanisch deutlich geringere Tragfähigkeit (13) (S. 1), (14), S. 2., (15) (S. 120, 129, 153), (16) (S.160), (17) (S.516).

Durchgehende Inserttypen können weiterhin nach ihrer Ausdehnung des Pottingmaterials im Kernbereich unterteilt werden, Tab. 3.

Nur die durch das Bohrloch angeschnitten Zellen sind mit Potting gefüllt.		
Vor der Sandwichherstellung gefüllte Wabenzellen im Lasteinleitungsbereich.		
	Ohne Deckschichtkragen	Mit Deckschichtkragen

Tab. 8: Kategorisierung von durchgehenden Inserts nach der Ausdehnung des Pottings sowie der Existenz von Deckschichtkragen.

4.1.6 Grundbelastungen von Insertelementen

Lokale Lastenleitungen mit Insertelementen können grundsätzlich auf vier unterschiedliche Lastfälle belastet werden, Abb. 12.

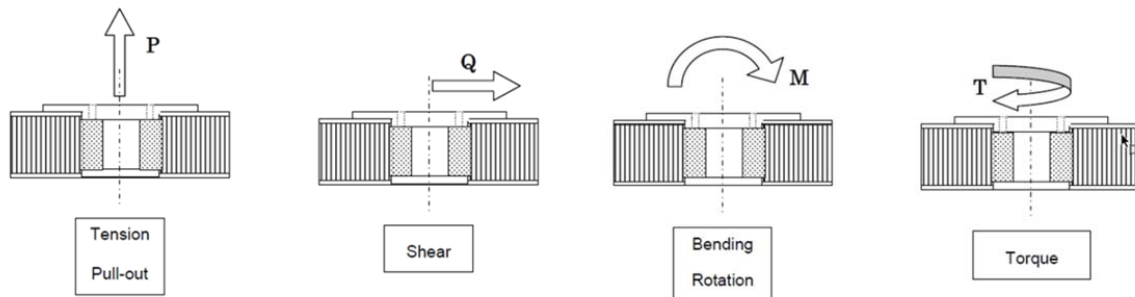


Abb. 75: Grundbelastungsarten auf Insertlastenleitungen (15) (S. 69).

4.1.7 Vordimensionierungsempfehlungen für lösbare Sandwichverbindungen

In mehreren Literaturquellen wird die konstruktive Vermeidung von Biegemomenten auf Insertelemente empfohlen, da diese gegenüber Biegemomenten eine sehr geringe Belastungsfähigkeit aufweisen, (18), (15) (S.160), (19) (S. 4). Dies kann konstruktiv z. B. in einer T-Stoß-Verbindung durch eine Doppelreihenanordnung der Insertlastenleitungen erreicht werden, Abb. 13.

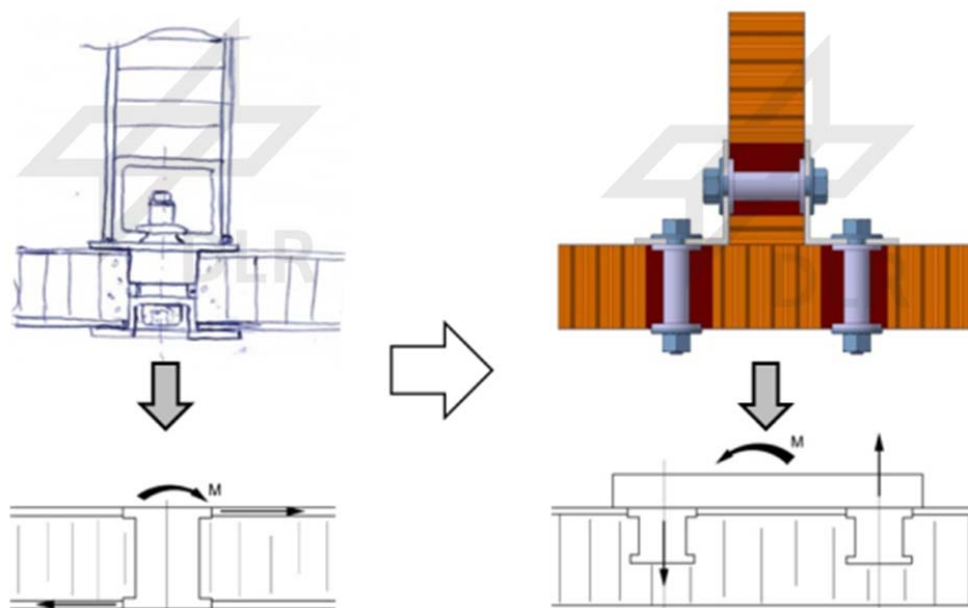


Abb. 76: Konstruktive Vermeidung von Biegemomenten auf die Insertlastenleitungen. Beispiel: Insert-Doppelreihenanordnung in einer T-Stoß-Verbindung (15), (S. 160).

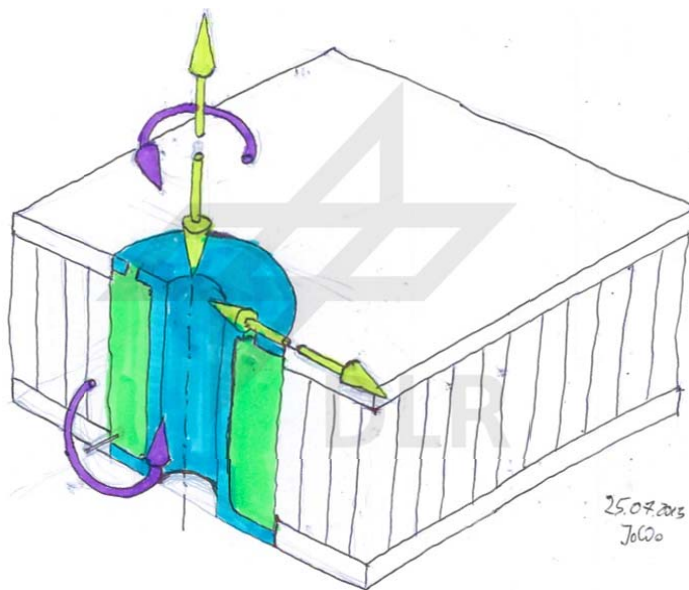
Bisher gibt es keine Abschätzformeln, die den Biegelastfall auf Insertverbindungen untersuchen. Thomsen jedoch hat mit der HOSPT (Higher Order Sandwich Plate Theory) einen Biegefall berechnet und beschreibt diesen in der mechanischen Wirkweise mit einer transversalen Belastung vergleichbar: Sandwichelemente mit biegeweichen (= dünnen) Deckschichten

vorausgesetzt, tritt ebenfalls als Erstversagensfall ein Schubversagen in den Wabenwänden neben dem Pottingbereich auf (13) (S. 79).




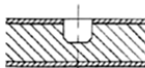
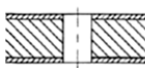
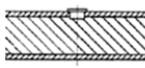
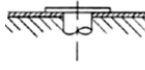
4.1.8 Insertmechanik

Sind die Lasten auf das Insert bekannt, gibt es in der aktuellen Literatur grobe, qualitative Empfehlungen für die Auswahl bestimmter Insertbauweisen, siehe Abb. 14, rechts.

Diese Empfehlungen sind jedoch nur für Inserts in Sandwichpaneelen mit metallischen Deckschichten geeignet, die z. B. viel gutmütiger auf Lochleibung reagieren und so auf ganz andere Versagensmechanismen hin ausgelegt wurden.



Auf ein Sandwichinsert wirkende Kräfte und Momente.

	Transverse force	In-plane force	Moment
			
 Partial	+	+	++
 Through-thickness	++	+++	++
 Rivet / screw	+	+	+++
 Flared top	+	++	+

Empfehlungen für die Eignung unterschiedlicher Insertprinzipien bzgl. der lokalen Lastarten und -größen.

Abb. 77: Empfehlungen für die Auswahl von Insertarten unter unterschiedlichen Belastungsarten (20)

Bei Sandwichstrukturen mit FKV-Deckschichten machen die hohe Steifigkeit auf Grund des hohen E-Modul des FKV-Materials sowie das Unvermögen des Ausgleichs innerer Spannungen (z. B. verursacht durch Verspannung bei der Montage) toleranzausgleichende Maßnahmen zwingend notwendig, die über die Inserts realisiert werden könnten.

Weiterhin ist keine Quelle bekannt, die Informationen zum Verhalten von Insertverbindungen unter mehrachsigen Belastungszuständen, also z. B. unter gleichzeitiger Zug- und Schubbelastung, liefert.

Im Projekt InGa sollen daher die spezifischen Versagensmechanismen von Inserts in FKV-Sandwichelementen untersucht, spezifische Gestaltungsregeln abgeleitet und damit zur Auslegung innovativer Insertgeometrien genutzt werden.

4.2 Zu untersuchende Sandwichverbindungsstellen im Projekt InGa

Im Folgenden werden wichtige Verbindungsstellen in Galleys erläutert, für die im Projekt InGa gewichtseffiziente, separierbare Verbindungen gefunden werden sollen.

4.2.1 Aufhängungen der Galley

Kleinere Galleys und vergleichbare Compartments (Toiletten, Schränke) werden statisch bestimmt über Dreipunkt-Verbindungen in der umgebenden Flugzeugstruktur angebunden. Größere Galleys werden über eine größere Anzahl an punktuellen Anbindungen befestigt.

Die Positionen der Decken- und Bodenaufnahmen am Flugzeugrumpf werden vom Flugzeughersteller vorgegeben.

Die Deckenbefestigungen von Flugzeuggalleys erfolgt mit Hilfe von Metallklammern, die mit den Deckenpaneelen der Galley verschraubt sind. In diesen werden Einzelstäbe oder Stabwerke verschraubt, die wiederum an bestimmten Spanten des Flugzeugrumpfs befestigt werden, vgl. Abb. 15.

Die Fußbefestigungen von Flugzeuggalleys erfolgt durch Verschraubung in den Sitzbefestigungsschienen (sog. „Seattracks“) im Fußboden.

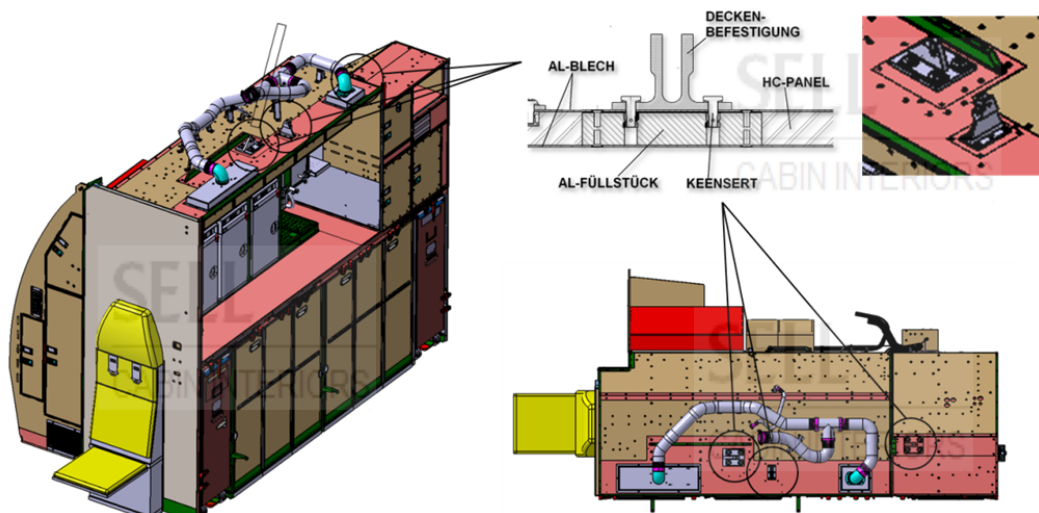


Abb. 78: Beispiel für Deckenbefestiger (Klammern) im Dachpaneel einer Galley in Sandwichbauweise

Diese Anbindungspunkte (sowohl Decken- als auch Fußbefestigung) sind unter mechanischen Gesichtspunkten nicht optimal in der Galleystruktur platziert. Die Positionierung der Anbindungspunkte wird nur durch eine optimale Anordnung der Fächer sowie die gegebenen Anbindungspositionen am Rumpf des Flugzeugs bestimmt. Daraus resultieren z. T. Lasteinleitungen in den Mitten von Sandwichplatten. Dadurch werden viele Sandwichelemente in der Struktur auch auf flächennormale Biegung beansprucht, woraus eine vergleichsweise schwere, ineffektive Struktur resultiert, vgl. hierzu auch den Halbjahresbericht 2013/1. Würde hingegen die Leichtbauregel befolgt, Lasten nur an Kanten, noch besser an Ecken einzuleiten, würden die Sandwichelemente der Struktur nur flächenparallel auf Zug, Druck und Schub belastet und könnten wesentlich leichter gestaltet werden. Hier besteht unter strukturellen Gesichtspunkten ein großes Leichtbaupotential.

Weiterhin bedingen Lasteinleitungen in der Mitte von Sandwichelementen schwere Lastverteilungselemente wie massive Aluminiumplatten, vgl. Abb. 15, Mitte oben. Könnten diese durch optimierte Insertverbindungen ersetzt werden, kann viel Gewicht gespart werden. Für

diese Anwendung eignen sich die im Projekt InGa entwickelten Insertkonzepte „Schraubinsert“ (siehe Abschnitt 2.4.2 ab Seite 90) sowie „Topfininsert“ (siehe Abschnitt 2.4.4 ab Seite 105).

4.2.2 Nut-Zapfen-Verbindungen im Tragwerk

Stand der Technik für T-Stoß-Verbindungen in der Sandwichstruktur der Galleys ist die Verklebung über Nut-Zapfen-Verbindungen, siehe Abb. 16. Für eine bessere Austauschbarkeit von funktionsintegrierten Sandwichpaneelen wird die Verwendung von optimierten Insertverbindungen angestrebt. Für diese Anwendung eignen sich die im Projekt InGa entwickelten Insertkonzepte „Schraubinsert“ (siehe Abschnitt 2.4.2 ab Seite 90), „Topfininsert“ (siehe Abschnitt 2.4.4 ab Seite 105) sowie das Randlasteinleitungskonzept „GFK-Klötzchen“ (siehe Abschnitt 2.4.7, Seite 150).

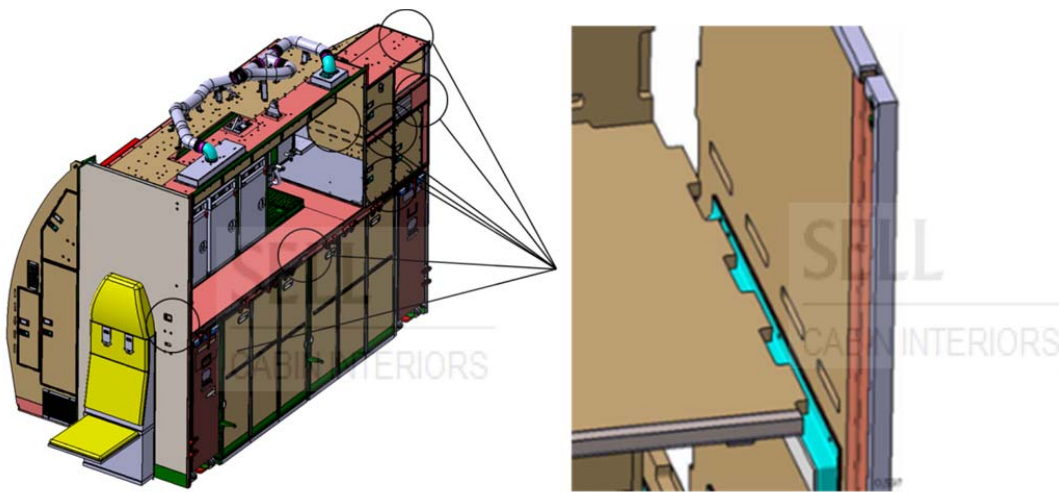


Abb. 79: Positionen von unlösbaren Nut-Zapfen-Verbindungen in einer Galley in Sandwichbauweise

4.2.3 Anbindungspunkte für die Erdungsverkabelung

Zur Befestigung der Erdungsverkabelung der Galleys werden konventionelle Inserts (z. B. Inserttyp „NAS 1836-3-11“) verwendet, siehe Abb. 17. Dafür müssen in regelmäßigen Abständen Bohrungen in die Außensandwichpaneele gesetzt werden. Die Inserts werden mit einer vergleichsweise großen Menge Klebstoff eingesetzt, da die angebohrten Wabenzellen des Kerns im Bohrungsbereich mit ausfüllen werden müssen. Die große Anzahl an Einzelteilen (Kabel, Schraube, Klammer) bedingen einen hohen Montageaufwand sowie ein hohes Gewicht.

Die auf die Erdungskabelhalterungen wirkenden Kräfte und Momente sind auf Grund der geringen Masse der Kabel sowie der geringen Abstände zwischen den Haltern jedoch vergleichsweise klein. Für diese Anwendung eignen sich die im Projekt InGa entwickelten Insertkonzepte „Integrierte Inserts“ (siehe Abschnitt 2.4.5 ab Seite 117) sowie die untersuchten Onserttypen (siehe Abschnitt 2.4.6 ab Seite 141).

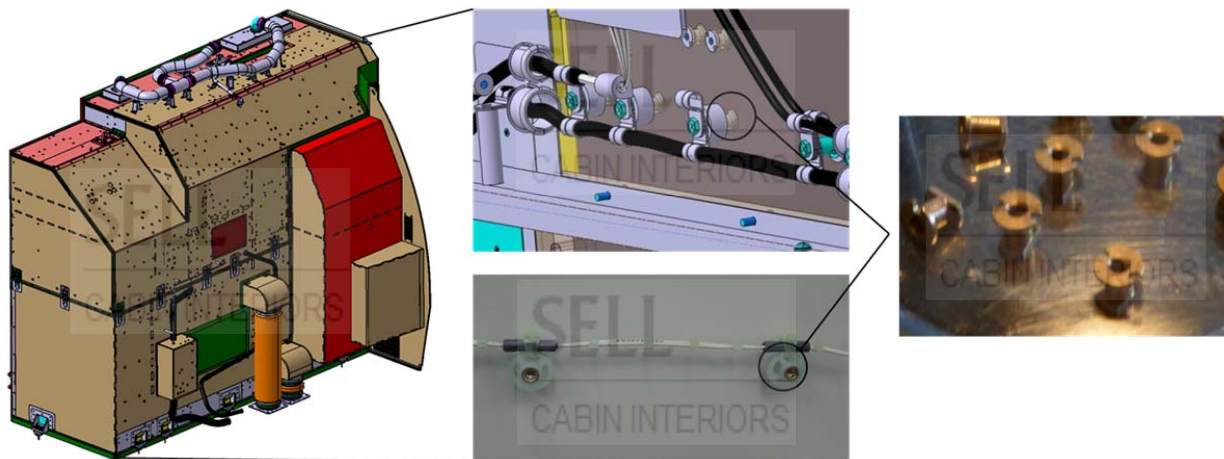


Abb. 80: Beispiel für die Befestigung von elektrischen Leitungen an der Rückseite einer Galley in Sandwichbauweise

4.2.4 Lasteinleitungen in der Sandwichfläche

Lokale Lasteinleitungen in den Flächen der Sandwichflächen werden benötigt, um Anschlagpuffer, Verriegelungen, Rohr- und Leitungshalter usw. befestigen zu können. Diese werden mit Hilfe über typischer Inserts nach dem Stand der Technik dargestellt. Diese benötigen vergleichsweise viel Klebstoff, um die angebohrten Zellen des Wabenkerns im Bohrungsbereich auszufüllen. Häufig werden Inserts des Typs „Verlorenes Insert“ eingesetzt, die vergleichsweise geringe Festigkeiten gegenüber Zug- und Momentenbelastungen aufweisen, vgl. Abb. 18 sowie Abb. 19. Für diese Hochlasteinleitungen eignen sich die im Projekt InGa entwickelten Insertkonzepte „Schraubinsert“ (siehe Abschnitt 2.4.2 ab Seite 90) sowie „Topfinsert“ (siehe Abschnitt 2.4.4 ab Seite 105). Die „Integrierte Inserts“ (siehe Abschnitt 2.4.5 ab Seite 117) sowie die untersuchten Onserttypen (siehe Abschnitt 2.4.6 ab Seite 141) können zur Anbindung von Elementen genutzt werden, die geringere Lasten verursachen.

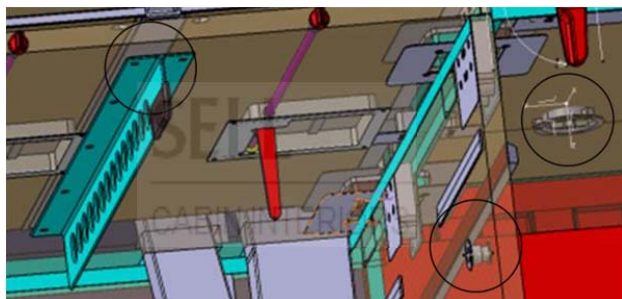


Abb. 81: Bereiche lokaler Krafteinleitungen in der Sandwichfläche

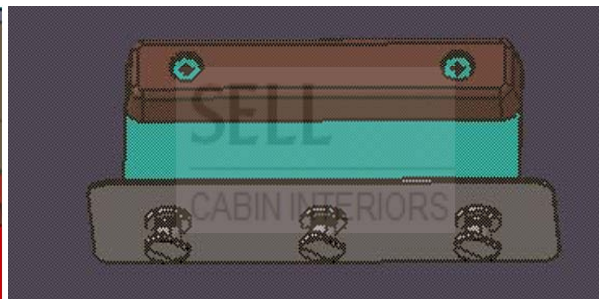


Abb. 82: Trolley-Anschlagpuffer als Beispiel einer lokalen Krafteinleitung, die mittels drei verlorener Inserts in der Fläche der Sandwichrückwand befestigt ist

4.2.5 Lasteinleitungen in der Sandwichstirnfläche

In den Stirnflächen der horizontal angeordneten Sandwichplatten der Galley sind Verriegelungsknebel installiert, die die Kücheneinsätze (Trolleys, Standardunits) bei Bewegungen des Flugzeugs gegen ein Herausrutschen bzw. -rollen aus den Fächern fixieren. Sie können zum Austausch des entsprechenden Kücheneinsatzes per Hand zur Seite geklappt werden. Auf diese Knebel wirken bei starken Beschleunigungen des Flugzeugs, z. B. durch Turbulenzen verursacht, hohe und teilweise schlagartige Kräfte und Momente.

Der aktuellen Stand der Technik der Knebelbefestigung in den Sandwichstirnflächen der Sandwichplatten sind Aluminium-Vollklötzchen, die in Ausfräsungen eingeklebt, mit Aluminium-U-Profilen eingefasst und anschließend mit einer Gewindebohrung versehen werden, siehe Abb. 20. Diese Bauweise zeigt neben einem hohen Gewicht eine mechanische ungünstige, sprunghafte Änderung der Steifigkeit zur umgebenden Sandwichstruktur.

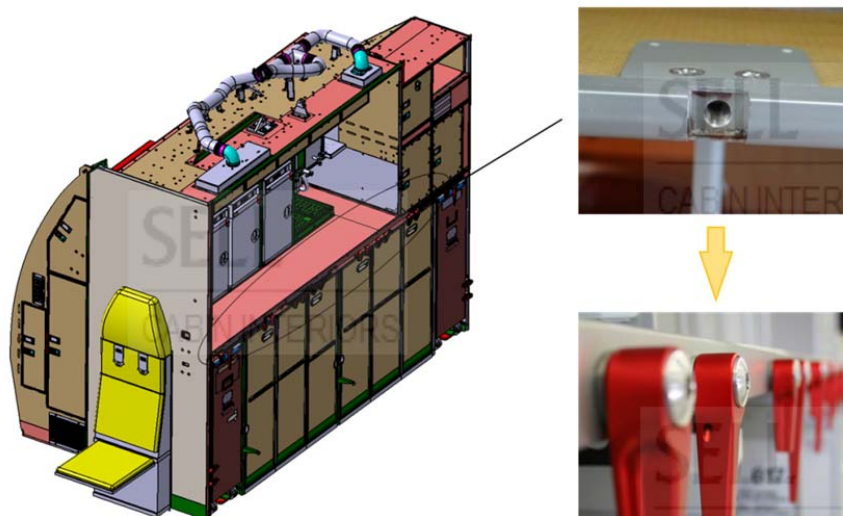


Abb. 83: Verriegelungsknebel in den Sandwichplattenstirnbereichen zur Fixierung von Containern und Kücheneinsätze als Lasteinleitungspunkte im Sandwichrand

Neben einer Optimierung der Knebelbefestigungen muss auch für separierbare Sandwich-T-Stoßverbindungen eine innovative Lösung mit hohem Leichtbaupotential für die Stirnanbindung der Stegplatte gefunden werden, siehe Abb. 21.

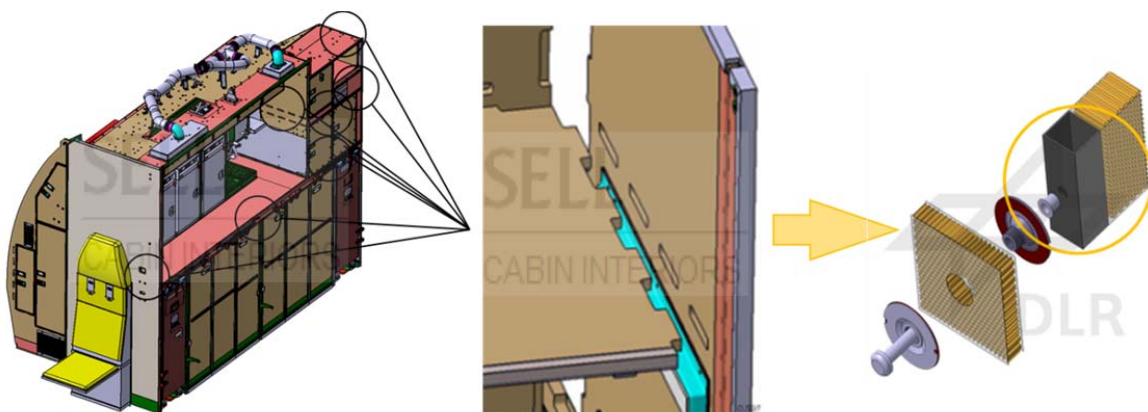


Abb. 84: Separierbare Sandwich-T-Stoßverbindung

Für beide Anwendungen eignen sich das im Projekt InGa entwickelte Randlasteinleitungskonzept „GFK-Klötzchen“ (siehe Abschnitt 2.4.7, Seite 150).

4.3 Spezifikation der Halbzeuge und Komponenten

In diesem Abschnitt werden die Materialien sowie die mechanischen Eigenschaften der zur Verwendung kommenden Halbzeuge und Komponenten spezifiziert, diese sind:

1. Die Sandwichhalbzeuge sowie deren Subkomponenten (Deckschichten, Wabenkerne)
2. Klebstoff 3M Scotch Weld 9300 B/A FST
3. Verwendete Schraubentypen
4. Aluminiummaterial der lokalen Deckschichtverstärkungen
5. Aluminiummaterial der Topf- und Schraubinsertkonzepte
6. Kunststoffmaterial ULTEM 9085 der Topfinsertkonzepte

4.3.1 Sandwichtypen 616 HC und 618 HC

Die beiden im Projekt zur Anwendung kommenden Sandwichtypen mit den Bezeichnungen „618 HC“ sowie „616 HC“ werden von der Fa. SELL GmbH als Standardsandwichhalbzeug für die Fertigung der gesamten Galleystruktur genutzt. Sie sind umfangreich qualifiziert bzw. zertifiziert und werden von der Fa. Schütz GmbH & Co. KGaA als Halbzeugplattenware geliefert. Die Sandwichtypen haben sich seit Jahrzehnten sowohl bei der Küchenfertigung und -montage als auch im Flugbetrieb als idealer Kompromiss aus Widerstandsfähigkeit und hinreichend geringem Gewicht bewiesen. Die Anfangs geplante Optimierung der Sandwichelemente an sich wurde aus diesen Gründen zu Beginn des Projekts verworfen und eine reine Konzentration auf die Verbesserung der Verbindungsstellen beschlossen.

Die Bezeichnungen „616 HC“ und „618 HC“ definieren sowohl die Materialien und Halbzeuge, das Herstellungsverfahren sowie die Grundgeometrien, vgl. auch (21). Die Sandwichtypen 618 HC und 616 HC sind in ihrem Aufbau sowie der Herstellung identisch, sie unterscheiden sich lediglich in der Höhe des Wabenkerns (616 HC: 9,4 mm, 618 HC: 21,3 mm).

4.3.1.1 Sandwichdecklagen (GF-Prepreg)

Die Deckschichten werden aus dem Prepreg mit der Bezeichnung *PF808-G220-50 T0 127* der Fa. Gurit GmbH gefertigt. Dies besteht aus einer mit Phenolharz getränkten Lage S2-Glasgewebe, Webart 8H bzw. Satin. Das Prepreg weist ein Flächengewicht von 610 g/m² auf. Wichtige mechanische Daten des Deckschichtprepregs sind in Tab. 4 dargestellt.

Parameter	Variable	Einheit	Wert
Zugfestigkeit	R_{11t}	MPa [N/mm ²]	600
Zugmodul	E_{11t}	GPa [10 ³ N/mm ²]	18
Biegefestigkeit	R_b	MPa [N/mm ²]	700
Biegemodul	E_b	GPa [10 ³ N/mm ²]	22
Glasübergangstemperatur	T_g	[°C]	125

Tab. 9: Mechanische Eigenschaften des Deckschichtprepregs PF 808-G220-50, (22)

4.3.1.2 Honigwabenhalbzeug für den Sandwichkern

Das Wabenkernhalbzeug *Coremaster N636-3,2-48* wird von der Fa. Schütz GmbH & Co. KGaA in der Größe 1270 x 3000 mm hergestellt und auf die Höhen 21,6 mm (Sandwichtyp 618 HC) sowie 9,6 mm (Sandwichtyp 616 HC) formatiert. Es besteht aus in Phenolharzmatrix getauchtes Para-Aramidpaper (sog. „Nomex“).

Flächen-	Mittlere	Mittlere	Mittlerer
----------	----------	----------	-----------

	gewicht	unstabilisierte Druckfestigkeit	Schubfestigkeit		Schubmodul	
Richtung	-	-	L	W	L	W
Variable	ρ_c	$\sigma_{c,us,avg}$	$t_{L,avg}$	$t_{W,avg}$	$G_{L,avg}$	$G_{W,avg}$
Einheit	[g/m ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Wert	30,52	2,67	1,95	0,93	132	59

Tab. 10: Mechanische Eigenschaften (Mittelwerte) des Kernwabenhalbbezugs Coremaster N636-3,2-48 (23).

4.3.1.2.1 Anisotropes Verhalten in die unterschiedlichen Flächenrichtungen

Durch das spezielle Fertigungsverfahren, bei dem aus ebenem Aramidpapier durch teilweises Verkleben und anschließendes Aufziehen die Wabenkörper erzeugt werden, resultieren unterschiedliche Anteile der doppelt ausgeführten wabenwände (In W-Richtung 0%, in L-Richtung 72%, (24) (Seite 93), siehe Abb. 22.

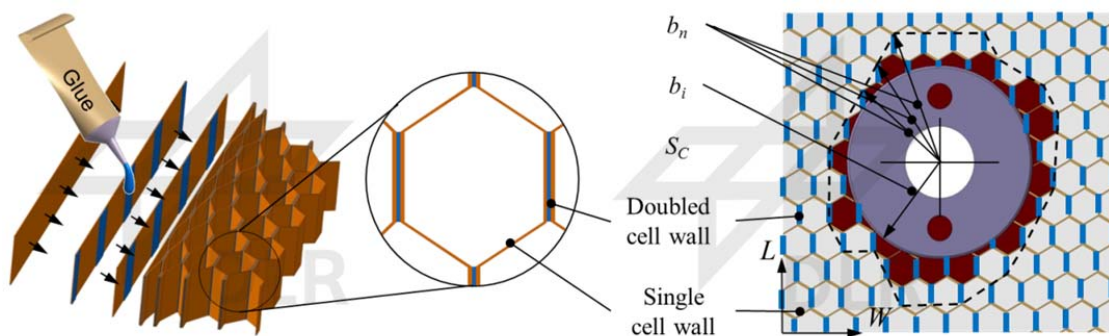


Abb. 85: Durch Herstellungseise der Honigwabenmaterials bedingter Anteil doppelter Wabenwände in der L-Richtung.

4.3.1.2.2 Berechnung des durchschnittlichen Schubfestigkeit nach ESA

Doppelte Wabenwände weisen eine wesentlich höhere Druck- und Schubsteifigkeit auf als Einzelwabenwände, wodurch die mechanischen Kennwerte in L-Richtung daher ungefähr doppelt so hoch sind als in W-Richtung (vgl. auch Tab. 4) (24) (S. 89). ESA (24) (S. 93) schlägt zur Berechnung einer mittleren Schubsteifigkeit des Honigwabenmaterials daher die Multiplikation der mittleren Schubfestigkeit in W-Richtung, $\tau_{W,typ}$ mit einem Faktor von 1,36 vor:

$$\tau_{c,typ} = \tau_{W,typ} \cdot 1,36 \quad (1)$$

4.3.1.3 Spezifikation Zwischenfolie als Feuchtigkeitssperre (Tetlar-Folie)

Durch Feuchtigkeit sinkt über die Jahre die mechanische Leistungsfähigkeit der Verklebung bzw. der Deckschicht-Kernanbindungen stark. Dagegen wird die sog. „Tetlar“-Folie des Herstellers Fa. DuPont AG als Feuchtigkeits- bzw. Diffusionssperre eingesetzt. Sie besteht aus dem thermoplastischen Kunststoff Polyvinylchlorid (PVC) mit einem Schmelzpunkt von ca. 180 °C. Die Folie ist selbstverschweißend und Airbus-zertifiziert.

4.3.1.4 Mechanische Eigenschaften der Sandwichtypen 616 HC sowie 618 HC

Die mechanischen Eigenschaften der Sandwichtypen 616 HC sowie 618 HC sind in Tab. 6 zu finden.

Sandwichtyp		616 HC		618 HC	
Ausrichtung des Wabenkernmaterial		L- Richtung ²	W- Richtung	L- Richtung	W- Richtung
Parameter	Einheit	Wert	Wert	Wert	Wert
Kernstärke	[mm]	9,4 +/- 0,1		21,4 +/- 0,1	
Sandwichstärke	[mm]	10 +/- 0,2		22 +/- 0,2	
Rohplattenmaß	[mm]	1210 x 2350		1210 x 2350	
Flächengewicht SELL	[kg/m ²]	1,6 – 1,8 (21)		2,2 -2,4 (21)	
Flächengewicht (Mittelwert aus Messungen)	[kg/m ²]	1,69 (25)		2,24 (25)	
Gesamtdichte	[kg/m ³]	166 (25)		101 (25)	
Gesamtsandwich, (Mittelwert aus Messungen)					
Vierpunkt-Biegeversuch					
Minimale Bruchkraft	[N]	860	860	1900	2100
Maximale Durchbiegung	[mm]	22	22	5	5
Minimale Bruchkraft	[N]	1300	2000	2400	4100
Trommelschälversuch					
Minimale Schälkraft	[N]	100	100	100	100

Tab. 11: Mechanische Eigenschaften der Sandwichtypen 616 HC und 618 HC der Fa. Schütz GmbH & Co. KGaA, (21).

Die Versagensarten der Sandwichtypen 616 HC und 618 HC im Dreipunkt- sowie Vierpunktbiegeversuch konnten nicht ermittelt werden, da das von der Fa. SELL GmbH zur Verfügung gestellte Datenblatt (21) keine Angaben enthält.

4.3.1.5 Spezifikation Schrauben

Vorgabe der Fa. SELL GmbH im Projekt InGa ist, dass auch für die innovativen Inserts nur Schrauben zur Verwendung kommen, die auch in der Fertigung der Fa. SELL GmbH eingesetzt werden. Die Fa. SELL GmbH benutzt zöllige Schrauben nach dem amerikanischen NAS-Standard, ein Luft- und Raumfahrtstandard für Schrauben mit Kegel-, Linsen- und Innensechskantköpfen, die die Toleranzgrößen definiert und eine Vereinheitlichung von Schraubengrößen zum Ziel hat.

So weisen beispielsweise Schrauben des Standards NAS 514 einen 100°-Kegelkopf, NAS 601-Schrauben Linsenköpfe mit Kreuzschlitzwerkzeugeingriffen auf. Für die innovativen Inserts in Frage kommende Schrauben sind in der folgenden Tabelle aufgelistet. Zum Vergleich sind analoge metrische Größen aufgeführt.

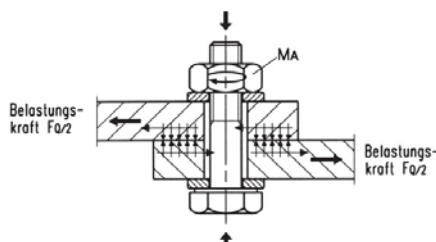
² W- und L-Richtungen im Honigwabenkernmaterial: Siehe Abb. 16.

Beispiel- schrauben	Gewinde	Beispiel	Schaftdurch- messer zöllig [inch]	Schaftdurch- messer metrisch [mm]	Ähnliche metrische Größe
NAS 514, NAS 602	6-32 UNF	Insertver- schraubungen	0,138	3,51	M3 – M4
NAS 514, NAS 602	8-32 UNF	Insertver- schraubungen	0,1640	4,17	M4
NAS 514, NAS 603	10-32 UNF	Insertver- schraubungen	0,1900	4,83	M5
NAS 517, NAS 604	1/4"-28 UNF	Befestigung Deckenbock	0,2500	6,35	M6
NAS 514	5/16"-24 UNF		0,3125	7,94	M8

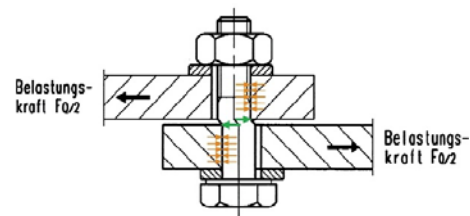
Tab. 12: Liste der für das Projekt zur Verfügung stehenden zölligen Schraubendurchmesser (Vorgabe Fa. SELL GmbH).

4.3.1.5.1 Wirkweisen der Schrauben (GV vs. SL-Schraubverbindungen)

Maßgeblich für die Gestaltung des Innenbereichs des Inserts ist die Gestaltung der Verschraubung. Verschraubungen können grundsätzlich auf zwei unterschiedliche Wirkmechanismen hin gestaltet werden: Bei der gleitfesten Schraubverbindung (folgend: „GV“) werden flächenparallele Lasten über die Reibung der Fügepartner übertragen, bei der Scher-Lochleibungs-Schraubenverbindung wird die Kraft durch Lochleibung bzw. durch Scherung des Schraubenschafts übertragen, (26), Abb. 23.



Gleitfeste Schraubenverbindung



Scher-Lochleibungs-Schraubenverbindung

Abb. 86: Unterschiedliche mechanische Wirkweisen von Schraubverbindungen (27).

Grundsätzlich ist die Gestaltung von Schraubverbindungen als GV-Verbindung anzustreben, da diese wesentlich leichter zu gestalten ist. Der Schaftdurchmesser kann wesentlich kleiner gestaltet werden, da der Schraubenschaft nicht auf Scherung belastet wird. Ein weiterer Vorteil der GV-Schraubenverbindung ist, dass keine Passbohrung notwendig ist, was das Bohren des Lochs sowie das Fügen und die Demontage der Verbindung wesentlich vereinfacht. Weiterhin können bei ungleichen Werkstoffpaarungen Isolierhülsen zum Korrosionsschutz eingesetzt werden.

Der Nachteil der GV-Schraubenverbindung ist, dass bei einem unbeabsichtigten Lösen der Schraube diese zu einer „unterdimensionierten“ SL-Verbindung wird, da sich die Fügepartner gegeneinander verschieben und der Schraubenschaft auf Schub belastet wird. Nun können nur noch sehr geringe Kräfte übertragen werden, da der Schraubenschaftdurchmesser für die Scherbelastung unterdimensioniert ist, die Schraubenschaft-Bohrungspaarung keine Passung aufweist (stärkeres Verkippen) sowie eine hohe Kerbwirkung herrscht (wenn das Gewinde der Schraube bis zur Trennstelle reicht).

Um eine Schraubenverbindung dennoch als GV-Schraubenverbindung auslegen zu können, muss ein Lösen der Schraubverbindung unbedingt verhindert werden. Dafür sind die folgenden Bedingungen Voraussetzung:

1. Die transversalen Höchstlasten die Schraubverbindung müssen präzise bestimmt, die Restklemmkraft berechnet und als ausreichend nachgewiesen werden, da transversale Lasten die Vorspannkraft reduzieren und damit die Klemmkraft unter das nötige Maß reduzieren können, was im schlimmsten Fall bis zum Aufklaffen der Fügepartner führen kann.
2. Zwischen den Fügepartnern muss durch geeignete Maßnahmen ein Gleitreibungskoeffizient von $\mu_0 \geq 0,5$ erreicht werden. Dies kann bei metallischen Fügepartnern durch z. B. ein Aufrauen der Oberfläche durch Sandstrahlen, bei FKV-Materialien durch Zwischenlegen von Zahnschreiben erreicht werden, (28), (27) (S. 36).
3. Das Anziehen der Schraubverbindung auf die korrekte Vorspannkraft muss drehmomenten-, besser winkelgesteuert erfolgen. Optimal ist das Anziehen der Schraube unter Verwendung eines Dehnungsmessgeräts (29) (S. 339).
4. Es muss eine wirksame Sicherung gegen das Lösen der Schraubverbindung integriert werden. Im Gegensatz zu einfachen Verliersicherungen (wie z. B. Federscheiben) müssen sog. „wirksame Sicherungen gegen Lösen“ eingesetzt werden, dies sind:
 - a. Eine Verklebung des Gewindes mit geeignetem mikroverkapseltem Klebstoff oder Flüssigklebstoff, (30) (S. 119), (31), (S.89 TB 8-16).
 - b. Nordlok-Zahnscheiben, (32).
 - c. Schrauben und Muttern mit Verriegelungszähnen oder Rippen an der Auflagefläche wie z. B. VERBUS TENSILOCK und VERBUS RIPP-Schrauben oder Schrauben mit wendelförmigem Gewindeeinsatz, (S. 119), (31), (S.89 TB 8-16).
5. Es müssen Verdrehmarkierungen wie z. B. ein Strich mit einem Speziallack über Kopf und Mutter, die Unterlegscheiben sowie die Fügepartner gesetzt werden, damit ein Lösen (und damit Verdrehen) der Elemente mit dem Auge erkannt werden kann.
6. Die (visuelle) Zugänglichkeit des Schraubenkopfs (sowie im Fall einer Konterung mit einer Mutter) der Mutter muss gewährleistet sein um eine regelmäßige Sichtkontrolle durchführen zu können.

In tragenden Strukturen von Luftfahrzeugen werden Schraubenverbindungen aus Sicherheitsgründen immer als Scher-Lohleibungsschraubenverbindung ausgelegt, da damit das „worst case“-Szenario, eine gelockerte Schraubenverbindung, abbildet (Gespräch mit Olaf Mierheim, DLR FA FLB). Um die Schraubverbindung dennoch als GV-Verbindung auslegen zu können, bestehen die folgenden konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten:

1. Verwendung von Schrauben mit Passschaft und Passungsloch (z. B. DIN 609), die im Fall des LöSENS eine höhere Scherbelastbarkeit aufweisen.
2. Durch Setzen von zusätzlichen Passbolzen, die die Schraube von der Scherbelastung bei Klemmkraftverlust, die Bauteile bleiben jedoch gegeneinander über die Passbolzen fixiert (Gespräch mit S. Uschmann, Bombardier Transportation).

Eigentlich GV-Schraubverbindungen angestrebt, in den Versuchen zeigte sich jedoch, das nicht bis zu den erwünschten Drehmomenten angezogen werden konnte; dies insbesondere bei den Randlasteinleitungs- und integrierten Insertkonzepten.

Bei den innovativen Insertformen, die im Projekt InGa konstruiert, gefertigt und getestet wurden, konnten die Schrauben teilweise nicht bis zu ihren minimalen Vorspannungen angezogen werden, da sonst die Insertverbindung geschädigt worden wäre. Hier besteht Handlungsbedarf bzw. müssen zukünftige Insertformen unbedingt angepasst werden, um die Schraubverbindung als GV-Schraubenverbindung auslegen zu können, um die (Gewichts-)Vorteile nutzen zu können. Bei Kunststoffinserts muss dafür der Zentralzylinder zur Aufnahme einer hinreichenden Schraubenklemmkraft in Metall ausgeführt werden.

4.3.1.5.2 Empfehlungen für Schrauben

Um das Gewicht der Schraube zu minimieren, wird weiterhin die Verwendung von Schraubentypen mit Sonderkopfformen empfohlen:

- Zylinderschraube mit niedrigem Kopf, Innensechskant, DIN 6912
- Zylinderschraube mit extrem niedrigem Kopf, Innensechskant, ON 1206*
- Niedriger Kopf, Torx, ISO 14580 *
- Niedriger Kopf, Torx, ON 15857
- Extrem niedriger Kopf, Torx, ON 9524*
- Extrem niedriger Kopf, Torx, ON 20146*
- Linsenkopf mit Flansch, Innensechskant, ISO 7380
- Linsenkopf, Torx, ON 6404 (ähnlich ISO 7380)*
- Linsenkopf, Torx, ON 5687 (ähnlich ISO 14583)*
- Linsenschraube eco-fix, Torx-Werkzeugeingriff, ON 5128 *, **

*) = (reduzierte Belastbarkeit nach ISO 898-1

**) = Reduzierte Anziehdrehmomente

4.3.2 Spezifikation Klebstoff: 2K 3M Scotch Weld 9300 B/A FST

Zur Verklebung aller Einzelkomponenten wurde der Zweikomponenten Epoxidklebstoff 9300 B/A FST der Fa. 3M Company verwendet, der bei der Fa. SELL GmbH als Standardklebstoff zum Fügen fast aller Verbindungen in der Galleystuktur genutzt wird.

Der Klebstoff zeichnet sich durch besondere FST-Eigenschaften aus, durch die er für die Verwendung im Flugzeuginterieur zertifiziert werden konnte. Er ist geruchsarm und thixotrop. Die Topfzeit beträgt 5 h, die Aushärtezeit bei Raumtemperatur 7 Tage, bei beschleunigtem Aushärten bei 60°C ist eine Aushärtung bereits innerhalb von 5 h möglich. Der Klebstoff wird als ein hartaushärtender Strukturklebstoff beschrieben, wird jedoch von der Fa. SELL GmbH auch für (Spalt-)Füllanwendungen wie z. B. Hohlkehlen in T-Stößen verwendet.

Die Verarbeitung erfolgt mit einer pneumatischer Kartuschenpresse (die als Leihgabe von der Fa. SELL GmbH zur Verfügung gestellt wurde) sowie den zugehörigen Mischdüsen der Fa. 3M Company. Das Mischen der Klebstoffkomponenten mit einer Mischdüse hat im Vergleich zum Mischen per Hand an der Atmosphäre den Vorteil, dass keine Luftblasen eingemischt werden, die die Festigkeit der Verklebung reduzieren.

Zur Einstellung der optimalen Schichtstärke enthält der Klebstoff Glaskügelchen mit geeignetem Durchmesser, nach Datenblatt 90 - 150 µm, vgl. (33). Ist beim Andrücken der zu verklebenden Elemente ein Knirschen zu hören, liegen die Glaskügelchen an beiden Fügepartnern an und die optimale Klebstoffschichtstärke ist erreicht. Dies relativiert sich aufgrund der vergleichsweise rauen Oberfläche der der GFK-Gewebedeckschichten der Sandwichpaneeltypen 616 HC und 618 HC. Dennoch hat sich diese Vorgehensweise zur Einstellung der Schichtstärke bei der Fa. SELL GmbH seit mehreren Jahren bewährt.



Abb. 87: Verwendeter 2K-Klebstoff 9300 B/A FST der Fa. 3M Scotch Weld in einer Doppelkartusche.



Abb. 88: Klebstoff in pneumatischer Kartuschenpresse, automatisches Mischen der Klebstoffkomponenten mit Hilfe einer vorgeschraubten Mischdüse.

4.3.2.1 Auftrag und Verteilung

Der Klebstoff wurde direkt aus der Mischdüse in Einwegspritzen gefüllt. Mit diesen wurde der Klebstoff in Streifen auf den zu verklebenden Einzelteilen einseitig aufgetragen, siehe Abb. 26. Das flächige Ausstreichen des Klebstoffs erfolgte mit Hilfe von Cutterklingen, mit denen eine homogene Schichtstärke erzielt werden konnte, siehe Abb. 26.

Mit speziellen Zahnspachteln (auch: Zahnrakel, Zahnleiste oder Zahnklinge, siehe Abb. 27) lässt sich ebenfalls eine noch homogenere Verteilung von des Klebstoffs erzielen. Dies jedoch mit dem entscheidenden Nachteil, dass beim Zusammendrücken der Teile in den klebstoffarmen „Tälern“ Luftblasen eingeschlossen werden, die unter mechanischen Gesichtspunkten unvorteilhaft sind. So verringert sich durch die Luftblasen die klebstoffbenetzte tragende Oberfläche, weiterhin begünstigen die Kerbwirkung der Lufteinschlüsse eine Rissentstehung und –ausbreitung in der Klebung.

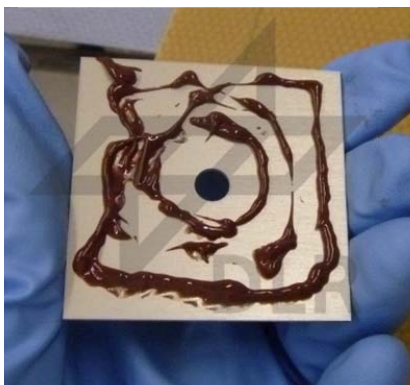


Abb. 89: Auftragen und Verstreichen des Klebstoffs mit einer Cutterklinge.

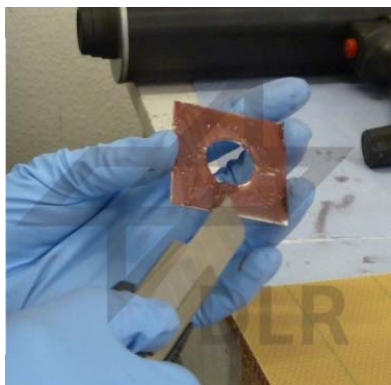


Abb. 90: Kunststoff-Zahnleiste als Option zum Verteilen und Einstellen der richtigen Klebstoffmenge.

Weitere Möglichkeiten zur Einstellung einer definierten, optimalen Klebstoffstärke, wie z. B. dem einlegen von GFK-Rovings oder Angelschnur, wurden aufgrund der Nachteile bzgl. der mechanischen Leistungsfähigkeit nicht wahrgenommen, auch weil die Schichtstärkeneinstellung über die Glaskügelchen im Klebstoff (besonders beim Schraubinsertkonzept) sehr gut funktionierte, vgl. Abschnitt 2.3.2.

4.3.2.2 Fügen und Verpressen

Nach dem Fügen der zu verklebenden Komponenten miteinander wurde darauf geachtet, dass der Anpressdruck möglichst nicht mehr reduziert wurde, um eine Aufstellung des Klebstoffs zu verhindern. Durch das Aufstellen wird Luft in Form von kleinen Äderchen in den Klebespalt gesaugt, was die Festigkeit durch Kerbwirkung reduziert.

Die optimale Methode, die Verklebung nach dem Fügen sofort flächig mit Gewichten zu belasten und damit eine homogene, gut dosierbare Anpresskraft zu erreichen, erwies sich bei der großen Anzahl an Probekörpern als zu aufwendig. Bei den Topfinsert-Sandwichtestkörpern wurden daher die Klebpartner per Schrauben, bei den übrigen Insert-Sandwichtestkörpern per Schraubzwingen und Klemmen gegeneinander verpresst, siehe Abb. 28 sowie Abb. 29.



Abb. 91: Fixierung der Doubler durch Schraube, Kotflügelscheibe (M5 x 35 mm) und Leimklammern auf einem Topfinert-Sandwichtestkörper für Sheartests.



Abb. 92: Fixierung der Doubler durch Schraubzwingen und Leimklammern auf einem GFK-Klötzchen-Testkörper für Pull-Out-Tests.

Kritisch müssen dabei besonders die Verklebungen der Doubler betrachtet werden. Weder mit Klemmen, Schraubzwingen oder Mittenverschraubungen inkl. großer Unterlegscheibe konnte eine über die Fläche ausreichend homogene Presskraftverteilung erzielt werden. In weniger belasteten Bereichen der Doubler zeigen sich daher zu dicke Klebstoffschichten (der Klebstoff SW 9300 B/A FST benötigt eine Schichtstärke von 90 - 150 μm für eine optimale mechanische Leistung, vgl. Abschnitt 2.3.2). Die Abweichungen von der optimalen Klebstoffschichtstärke sind jedoch nicht als kritisch zu betrachten, da auch in der Fertigung bei der Fa. SELL GmbH bei kleineren Verstärkungselementen teilweise nur durch Schraubzwingen oder lokale Verschraubungen angepresst wird, woraus ebenso inhomogene Klebstoffschichtstärken und eine damit eine suboptimale Klebstoffleistungsfähigkeit resultiert. Damit wird bei den Tests „sehr nah an der Wirklichkeit“ getestet bzw. wird damit ein gewisser „Knock-Down-Faktor“ zur sicheren Seite generiert.

Für zukünftige Verklebungen der Doubler wird dennoch das flächige Zusammendrücken per Presse empfohlen.

4.3.3 Spezifikation der lokalen Verstärkungen (sog. „Doubler“)

Bei den innovativen Inserts mit einem Kragendurchmesser (= maximaler Gesamtdurchmesser) kleiner 40 mm wurden Doubler der Größe 40 x 40 mm, so wie sie bereits bei den 1993er-Tests der Fa. SELL GmbH zu Einsatz kamen, verwendet.

Bei den innovativen Inserttypen mit einem Kragendurchmesser größer 40 mm wurden Breite und Länge der Doubler so gewählt, dass die Doubler an allen Seiten min. 2 mm über den Insertkragen hinausstehen bzw. insg. 4 mm breiter als die jeweiligen Insertkragen sind.

Damit wurde analog zum Vorgehen der Fa. SELL GmbH verfahren, deren getesteter, konventioneller Inserttyp mit dem größten Kragen (*Inserttyp 0-127-0015-00000*) rundherum 3 mm kleiner als die benutzten Doubler (32 mm zu 40 mm) war.

Informationen zum Aluminiummaterial sowie zur Oberflächenbehandlung liegen nicht vor.

4.3.4 Spezifikation Materialien für die innovativen Insertkörper

4.3.4.1 Aluminiummaterial für Topf- und Schraubinserts

Die Aluminiumversionen der Topf- und Schraubinserts wurden im spanabhebenden Verfahren aus Aluminium mit der Werkstoffbezeichnung EN-AW-7022 hergestellt.

4.3.4.2 Kunststoffmaterial ULTEM 9085 für die Topfinsets







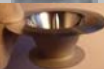



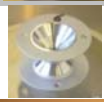


Für die Kunststoffvarianten der Topfinsets kommt der thermoplastische Kunststoff ULTEM 9085 zu Einsatz, da er für die Darstellung von kleineren Kunststoffteilen im Flugzeuginterieur aufgrund besonders guter FST-Eigenschaften zertifiziert ist. Darüber hinaus ist der Kunststoff als Rohstoff für die Verarbeitung im Rapid-Prototyping-Verfahren FDM (Fused Deposition Modeling) erhältlich. Grundlage ist eine Mischung aus Polyetherimid (PEI). Die im RP-verfahren verarbeitete Kunststoff weist sehr gute mechanische Eigenschaften (siehe Tab. 8) auf, so dass Strukturbauteile direkt mit dem RP-Verfahren hergestellt werden können.

Parameter	Einheit	Wert	Prüfmethode
Zugfestigkeit, Typ 1,	N/mm ²	72	ASTM D638
Zug-Elastizitäts-Modul	N/mm ²	2220	ASTM D638
Dehnung, Typ 1,	%	6	ASTM D638
Biegefestigkeit, Methode 1	N/mm ²	115,1	ASTM D790
Biege-Elastizitäts-Modul, Methode 1	N/mm ²	2500	ASTM D790
IZOD-Schlagzähigkeit, Methode A 23°C	J/m	613,8	ASTM D256
IZOD-Kerbschlagzähigkeit, Methode A 23°C	J/m	106	ASTM D256
Druckfestigkeit	N/mm ²	104	ASTM D695
Druckmodul	N/mm ²	1930	ASTM D732
Zugscherfestigkeit	N/mm ²	57	ASTM D732

Tab. 13: Mechanische Kennwerte des im Rapid-Prototyping-Verfahren FDM verarbeiteten Kunstoffs ULTEM 9085 (PEI), (34).

4.4 Untersuchte Inserttypen im Projekt InGa

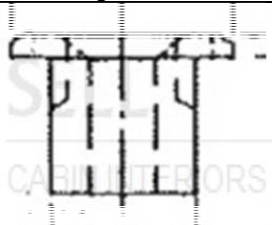
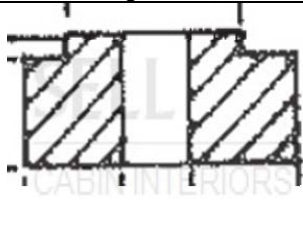
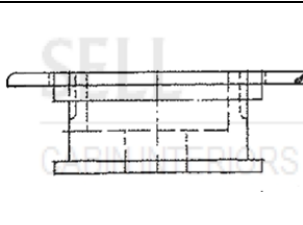
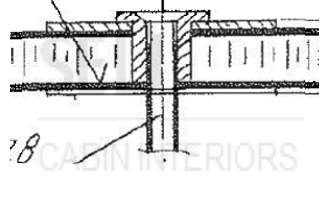
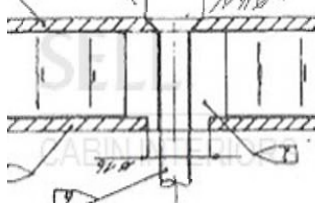
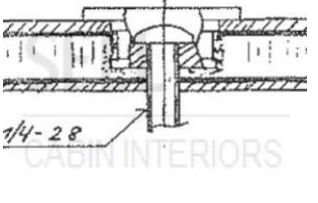
Im Rahmen des Projekts InGa wurden sowohl Standardinserttypen als auch neuartige Inserttypen untersucht, Tab. 9.

Bezeichnung des Inserts	Abbildung des Inserts	Gewicht Insert (gemessen, Mittelwert aus 10 Messungen)	Gewicht Schrauben-anteil	Gewicht Klebstoff (Rückrechnung Mittelwert aus 5 Messungen)	Gewicht unverstärkte Insertverbindung ohne Schrauben-anteil (gewogen, Mittelwert aus min. 10 Messungen)
Käufliche Inserts					
5041-02-0031-12		0,572 g	0,99 g	0,302 g	1,864 g
5041-02-0029-12		1,942 g	1,91 g	0,822 g	4,674 g
NAS 1834A4-394		1,547 g	3,19 g	2,731 g	7,468 g
NAS 1835A4		5,974 g	0,91 g	4,004 g	10,888 g
NAS 0-127-0054-00000		6,935 g	5,77 g	6,654 g	19,359 g
Im Projekt InGa entwickelte Inserts					
Topfininsert Aluminium, 10 mm		7,37 g	/	1,494 g	8,846 g
Topfininsert Aluminium, 22 mm		14,076 g	/	1,338 g	15,335 g
Topfininsert ULTEM 9085, 10 mm		3,342 g	/	1,395 g	4,745 g
Topfininsert ULTEM 9085, 22 mm		8,382 g	/	1,779 g	10,156 g
Schraubinsert Aluminium, 10 mm (beide Teile zusammen)		5,360 g	/	0,465 g	5,826 g
Schraubinsert Aluminium, 22 mm (beide Teile)		9,145 g	/	0,584 g	9,718 g
Integriertes Insert, Steckkonzept, Stahl, 10 mm (beide Teile)		9,19 g	/	0 g*	9,19 g
Integriertes Insert, Schraubkonzept, Stahl, 22 mm (beide Teile)		12,64 g	/	0 g	12,64 g

Tab. 14: Im Projekt InGa untersuchte und getestete Inserttypen (Schraub- und Topfininsert CRES wurden nicht getestet).

4.4.1 Konventionelle Inserttypen

Folgend sind Beispiele von standardisierten Inserttypen, die im Jahr 1993 durch die Fa. SELL GmbH getestet wurden dargestellt, Tab. 10. Eine komplette Übersicht über alle getesteten Inserttypen bieten die Quellen: (35), (36), (37).

Insert-bezeichnung	5041-02-0029-33	Filler_block_25-22_round+ledge	0-127-0054-00000
Beschreibung	Durchgehendes Insert mit Pilzkopf, für durchgehende Einsteckschraube	Durchgehender Block mit durchgehender Schraubenaufnahme	Durchgehendes Insert mit versenkter Schraubenaufnahme
Sandwich-bezeichnung	16E, 17E2	18E	16E
Lokale Verstärkung	Doubler Sheet 40 x 40 x 1mm, ober- und unterseitig	Doubler Sheet 100 x 100 x 1mm, ober- und unterseitig	60 x 75 x 1mm, ober- und unterseitig
Abbildung Insertkörper			
Bezeichnung Schraube	NAS 514, Schraubengewinde 1/4"-28 UNF	NAS 514, Schraubengewinde 1/4"-28 UNF	NAS 514, Schraubengewinde 5/16"-24 UNF
Abb. des Inserts im Sandwich-verbund			
Gewicht der Insert-verbinding	22,72 g	142,36 g	23 g
Versagenslast unter Zug	6724 N	18439 N	4057 N
VBG Zug	296 N/g	129,5 N/g	176,5 N/g

Tab. 15: Beispiele für 1993 von der Fa. SELL GmbH getestete Insertverbindungen (35), (38).

Im Jahr 2013 wurden weitere standardisierten Inserttypen ergänzend durch die Fa. SELL GmbH getestet, Tab. 10. Eine Übersicht über die 2013 getesteten Inserttypen bietet die Quelle: „2014-02-06_InGa_Präsentation_2013er_Inserttests_SELL_DBö.pptx“.

4.4.1.1 Insert-Sandwichprobekörper

Die Fertigung der Sandwichpaneele für die Probekörper wurde komplett von der Fa. SELL GmbH übernommen und kann dem Testplan „2013-10-09_Testplan_Pull-Out+Shear_konventionelle_Inserts_K-1156ALL-1000-21 Rev new_IN_DaBö.doc“, erstellt von Herrn Daniel Bösser, Fa. SELL GmbH, entnommen werden.

4.4.1.2 Tests der konventionellen Inserttypen

Bereits im Jahr 1993 wurden alle von der Fa. SELL GmbH Inserts, welche zur Herstellung von tragenden Sandwichstrukturen von Flugzeuggalleys eingesetzt werden, umfangreichen mechanischen Tests unterzogen (Pull-Out-sowie Sheartests). Die Testergebnisse wurden dem DLR FA FLB freundlicherweise zur Verfügung gestellt und theoretisch ausgewertet. Die Ergebnisse dienten u. a. zur Berechnung der Verbindungsgüten der Insertverbindungen sowie zur Ableitung von Konstruktionsmerkmalen für die Entwicklung der innovativen Insertverbindungen.

Weiterhin wurden im Projekt InGa von der Fa. SELL GmbH ausgewählte, konventionelle Insertverbindungen in optimierten Sandwichprobekörpern untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden ebenfalls dem DLR FA FLB für Auswertungen zur Verfügung gestellt, ihre Auswertung ist Bestandteil des Halbjahresberichts 2015/1.

Eine kurze Übersicht über die 2013er-SELL-Tests bieten die Unterlagen „20140206 AP2 DBH.pptx“ des Vortrags von Herrn Daniel Bösser der Fa. SELL GmbH, vorgestellt auf dem Statusmeeting am 06.02.2014 in Braunschweig sowie der Testplan „2013-10-09_Testplan_Pull-Out+Shear_konventionelle_Inserts_K-1156ALL-1000-21 Rev new_IN_DaBö.doc“, erstellt von Herrn Daniel Bösser, Fa. SELL GmbH.

4.4.1.2.1 Testergebnisse, Festigkeitsberechnungen, Mittelwerte, statistische Auswertung

Die Testergebnisse, Festigkeitsberechnungen, Mittelwerte sowie die statistische Auswertung der getesteten Standardinserttypen der 1993er Tests können den folgenden SELL-Dokumenten entnommen werden: (35), (36), (37).

Die Testergebnisse, Festigkeitsberechnungen, Mittelwerte sowie die statistische Auswertung der getesteten Standardinserttypen der 2013er Tests können den folgenden SELL-Dokumenten entnommen werden:

„Bösser_D_Testreport_Konventionelle_Inserts_K-1156ALL-1000-22_SELL_Rev_new_RZe.doc“.

4.4.1.2.2 Massenbestimmung der Einzelkomponenten der SELL-Tests an konventionellen Inserts

Die Massen der Einzelteile der Insertverbindungen mit Standardinserts, wie sie bei der Fa. SELL GmbH genutzt werden und 1993 von der Fa. SELL GmbH getestet wurden, sind in einer Datenbank gelistet:

„2015-06-02_Inserts_Massen_Volumen_v1-27_JWo.xlsx“

Da dem DLR die Insert-Sandwich-Testpaneele nicht vorlagen, konnten die Gewichte der Pottingvergussmassen nicht durch Zurückrechnen aus der Gesamtmasse bestimmt werden. Daher wurden auch diese theoretisch abgeschätzt.

Sie wurden nach dem in Kapitel 2.6 beschriebenen Vorgehen ermittelt, mit der Abweichung, dass die einzelnen Insertkörper vor der Installation in den Sandwichprobekörpern dem DLR nicht vorlagen und daher deren Massen über eine theoretische Abschätzung der Volumen nach den Zeichnungsdaten aus (35), (36) und (39) vorgenommen wurden.

4.4.1.2.3 Bestimmung der Verbindungsgüten der Standardinsertvarianten

4.4.1.2.3.1 Transversale Belastung („Pull-Out“)

Die Ergebnisse der 1993er SELL-Inserttests unter transversaler Belastung (Pull-Out) zeigt Abb. 94. Dargestellt sind die Verbindungsgüten über den Gewichten der Insertverbindungen.

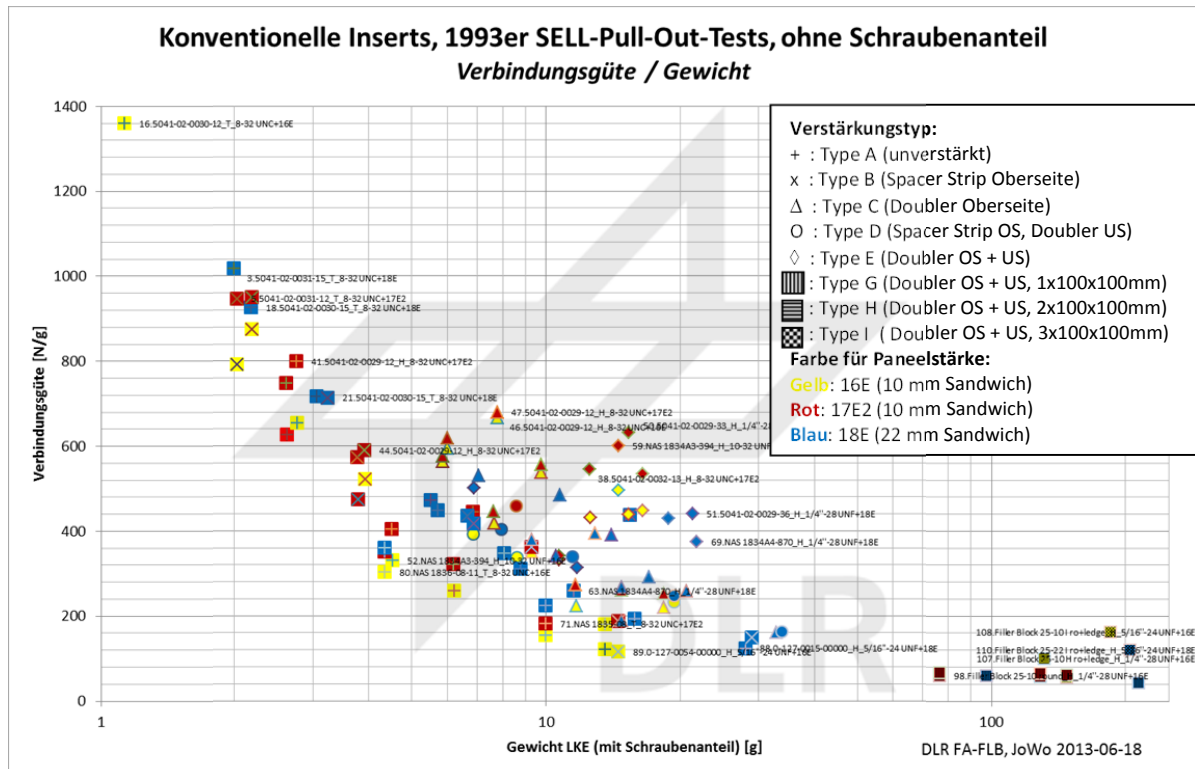


Abb. 93: Verbindungsgüte über Gewicht der auf Zug belasteten Insertverbindungen.³

- Das Insert 5041-02-0031-12 im Sandwichpaneel 17E2 ohne lokale Verstärkungen und das Insert 5041-02-0030-12, ebenfalls unverstärkt im Sandwichpaneel 17E2, zeigen die höchsten VBG_{Zug} (791 N/g bzw. 674 N/g), die Insertverbindungen Filler Block 25-10 round im Sandwich 16E mit beidseitiger Doublerverstärkung (100 x 100 x 1 mm) und die Insertverbindung Filler Block 25-22 round im Sandwich 18E mit beidseitiger Doublerverstärkung (100 x 100 x 1 mm) die geringsten VBG_{Zug} (58 N/g bzw. 65 N/g).
- Eindeutig ist der Trend erkennbar, dass die leichteren Insertverbindungen eine höhere VBG_{Zug} als die Schwereren aufweisen. Da die VBG_{Zug} der leichten Inserts z. T. mehr als doppelt so hoch sind als die VBG_{Zug} der schweren, kann durch den Einsatz vieler leichter Insertverbindungen bei gleichem Belastungsniveau eine leichtere Gesamtverbindung bzw. bei gleichem Gewicht eine höherfeste Gesamtverbindung generiert werden. Aus der höheren Anzahl an Insertverbindungen resultiert jedoch ein erhöhter Fertigungsaufwand. Hier muss zwischen Gewichtersparnis und Herstellungsaufwand das Optimum ermittelt werden.
- Im Bereich der leichten Insertverbindungen (< 4 g) zeigen die Insertverbindungen ohne lokale Verstärkungen die besten VBG_{Zug} , bei den schwereren Insertverbindungen (> 4 g) sind lokale Verstärkungen notwendig, um hohe VBG_{Zug} zu erreichen. Je schwerer die

³ Quelle: 2015-05-05_InGa_Auswertung_SELL-Inserttests_v0-27_FA-FLB_JWo_FINAL_ALTE_ERGEBNISDARSTELLUNG.xlsx

Insertverbindung ist, desto effektiver wird auch eine lokale Verstärkung bei Zugbelastung.

- Die Insertverbindungen zeigen mit den 10 mm-Sandwichplatten 16E und 17E2 nahezu über die gesamte Gewichtsspanne höhere VBG_{Zug} als mit den 22 mm-Sandwichplatten. Dies legt nahe, dass das zusätzliche Kernmaterial sowie die zusätzliche Insertlänge in den 22 mm-Sandwichplatten wenig zur Zugfestigkeit der Insertverbindung beiträgt.
- Inserts mit Einschraubgewinde zeigen eine höhere VBG_{Zug} als Inserts mit Durchsteckschraube, da sie eine geringere Länge der Schraube im Insert aufweisen.

4.4.1.2.3.2 Flächenparallele Belastung („Shear“)

Abb. 95 zeigt die Ergebnisse der 1993er SELL-Schubtests, dargestellt sind die Verbindungsgüten über den Gewichten der Insertverbindungen.

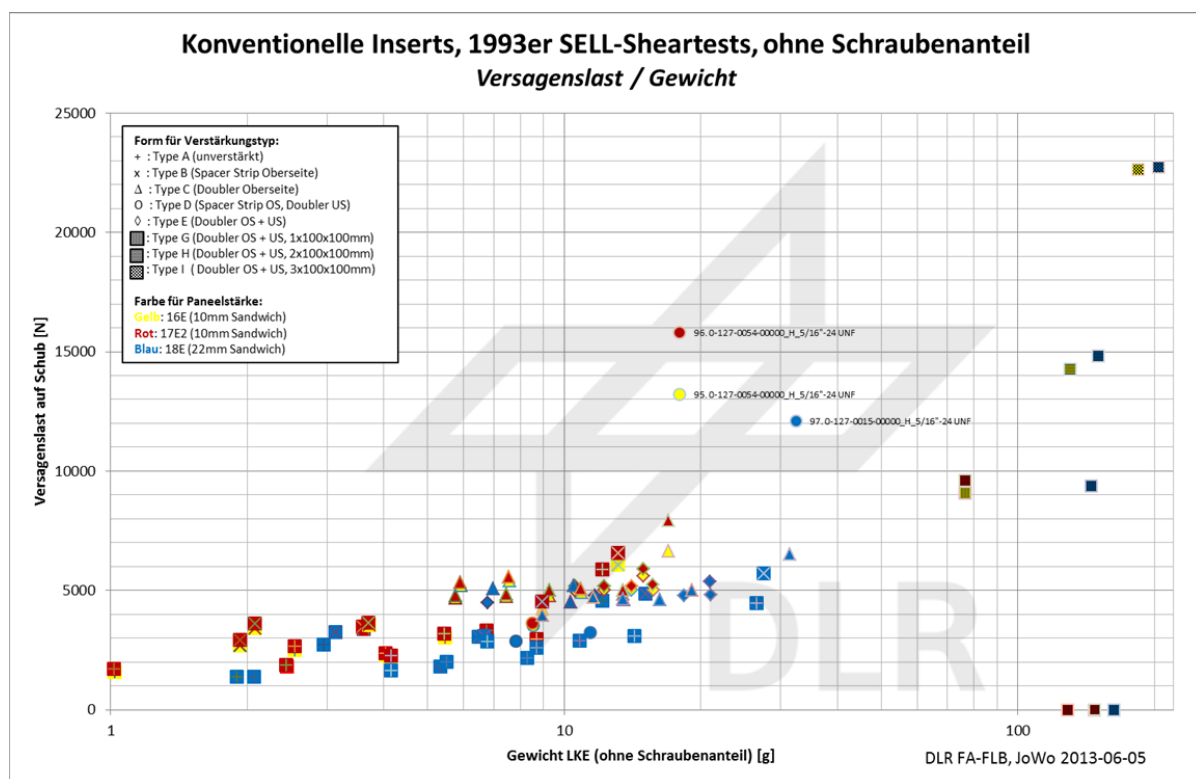


Abb. 94: Verbindungsgüte über Gewicht der auf Schub belasteten Insertverbindungen.⁴

- Das Insert 5041-02-0030-12 zeigt im Sandwichpaneel 16E mit Spacer Strip-Verstärkung auf der Oberseite (40 x 10 x 0,8 mm) und im Sandwichpaneel 17E2 mit identischer Verstärkung die höchsten VBG_{Schub} (966 N/g bzw. 616 N/g), die Insertverbindungen *Filler Block 50-22 round* im Sandwich 18E mit beidseitiger Doublerverstärkung (100 x 100 x 1 mm) und die Insertverbindung *Filler Block 25-22 H ro+ledge* im Sandwich 18E mit beidseitiger Doublerverstärkung (100 x 100 x 2 mm) die geringsten VBG_{Schub} (104 N/g bzw. 104 N/g).
- Vergleichbar mit den Ergebnissen der Zugtests zeigen auch bei den Schubtests die leichten Insertverbindungen eine höhere VBG_{Schub} . Bei den Schubtests ist allerdings ein

⁴ Quelle: 2015-05-05_InGa_Auswertung_SELL-Inserttests_v0-27_FA-FLB_JWo_FINAL_ALTE_ERGEBNISDARSTELLUNG.xlsx

Peak besonders hoher VBG bei den Insertverbindungen mit Gewichten zwischen 3 - 4 g zu erkennen.

- Dennoch ist bei den Schubtests der Trend erkennbar, dass leichtere Insertverbindungen eine höhere VBG_{Schub} als die schwereren aufweisen. Da die VBG_{Schub} der leichten Inserts z. T. mehr als doppelt so hoch sind wie die VBG_{Schub} der schweren, kann durch den Einsatz vieler leichter Insertverbindungen eine leichtere Gesamtverbindung bzw. bei gleichem Gewicht eine höherfeste Gesamtverbindung generiert werden. Aus der höheren Anzahl an Insertverbindungen resultiert jedoch ein erhöhter Fertigungsaufwand. Hier muss zwischen Gewichtersparnis und Herstellungsaufwand das Optimum ermittelt werden.
- Unter Schubbelastung zeigt sich, dass im Bereich der leichten Insertverbindungen (< 6 g) die Insertverbindungen mit leichten lokalen Verstärkungen („Spacer Strips“) die besten VBG_{Schub} aufweisen, bei den schwereren Insertverbindungen (> 6 g) sind größere lokale Verstärkungen notwendig, um hohe VBG_{Zug} zu erreichen. Je schwerer die Insertverbindung ist, desto effektiver wird die lokale Verstärkung bei Schubbelastung.
- Die Insertverbindungen zeigen mit den 10 mm-Sandwichplatten 16E und 17E2 nahezu über die gesamte Gewichtsspanne höhere VBG_{Schub} als mit den 22 mm-Sandwichplatten.
- Inserts mit Einschraubgewinde zeigen eine höhere VBG_{Zug} als Inserts mit Durchsteckschraube, da sie eine geringere Länge der Schraube im Insert aufweisen.

Auffällig ist das Versagensverhalten der Insertverbindungen, die in den 1993er SELL-Tests untersucht wurden. Es kommt sowohl unter Zug- wie auch Schubbelastung immer zum lokalen Deckschichtversagen bzw. zum Ausreißen der Inserts aus der FKV-Deckschichthaut. Kein Versuch zeigte z. B. ein Schraubenversagen. Ein Grund könnte die im Vergleich zu metallischen Werkstoffen wesentlich geringere Lochleibungsfestigkeit der FKV-Deckschichten sein. Dies ist ein Indikator dafür, dass die getesteten Inserts für Sandwichelemente mit FKV-Deckschichten, wie sie die Konfigurationen 16E, 17E2 und 18E aufweisen, wenig gut geeignet sind. Ebenso sind damit die zur Verwendung kommenden Schrauben in Verbindung mit Sandwichstrukturen mit dünnen FKV-Deckschichten deutlich überdimensioniert.

4.4.1.3 Diskussion der Tests, Bewertung der Ergebnisse

Die im Rahmen des Projekts InGa im ersten Halbjahr 2014 vorgenommenen Tests an konventionellen und innovativen Inserts sind geeignet, um eine genauere, kritische Bewertung der im Jahr 1993 bei der Fa. SELL GmbH vorgenommenen Tests an konventionellen Inserts vorzunehmen. Hier wurde deutlich, dass bei den damaligen Tests einige Fehler gemacht wurden, die im Folgenden diskutiert werden. Dies betrifft die z. T. zu geringe Dimensionierung der Testsandwichpaneele (und folglich verfälschten Versagensformen), die Verwendung unterschiedlich großer lokaler Verstärkungen (Doublers) in zu vergleichenden Testkörpern, sowie eine korrekte Auflösung der Versagensabfolge.

4.4.1.3.1 Zu geringe Größe der Sandwichpaneele der Testkörper

Wird die Größe der Insert-Sandwichprobekörper zu klein gewählt, bildet sich keine Biegelinie der Sandwichplatte zwischen den Einspannungen aus. Stattdessen reagiert die Sandwichplatte mit z. B. Kernschubbruch, vgl. Abb. 30 mit Abb. 31. Da bei den betrachteten Flugzeuggalleys die Inserts tendenziell in vergleichsweise großen Paneelen eingebracht werden, bildet dieses Versagensverhalten nicht die Realität ab.

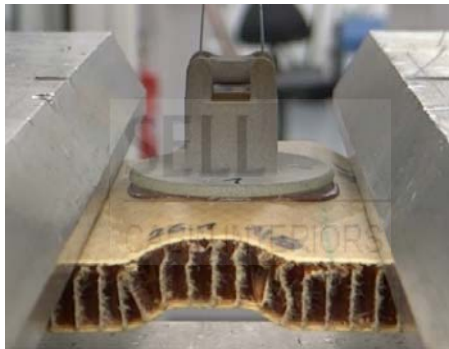


Abb. 95: Beispiel für ein unerwünschtes, zu frühes Kernschubversagen der Sandwichplatte noch vor der Schädigung des Inserts aufgrund unzureichender Größe der Einspannfläche bzw. zu kleinem Testsandwichpaneel



Abb. 96: Anderes Versagensbild der Onsertverbindung (kohäsives Versagen des Klebstoffs auf Zug) bei Verwendung einer geeigneten Sandwichpaneelgröße

Bei den 1993er Tests der Fa. SELL GmbH wurden fälschlicherweise aus derartigen Versuchen Versagenslasten zur Errechnung „Allowable loads“ für Inserts herangezogen, die eigentlich die Sandwichversagenslasten auf Kernschub sind. Bzw. liefert eine Geometrieconfiguration, bei der das Sandwich vor dem Insert zum Versagen gebracht wird, weder für das Versagensverhalten noch die Versagenshöhe des Inserts ein korrektes Ergebnis.

4.4.1.3.2 Doublergrößen vs. zu kleine Einspannbreiten

Darüber hinaus ragten auf Grund der geringen freien Sandwichlänge lokale Verstärkungen aus Aluminiumblech (sog. „Doubler“) z. T. bis unter die Einspannungen, so dass faktisch ein weiterer Sandwichstandard (Sandwich mit oberer Deckschicht aus GFK-Aluminium-Komposite) getestet wurde, siehe Abb. 32.

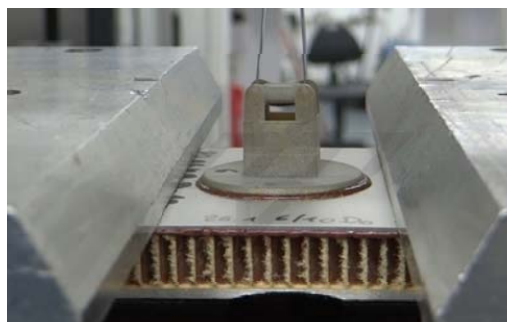


Abb. 97: Ein sog. „Doubler“, eine eigentlich lokale Verstärkung des Lasteinleitungsbereichs durch eine Aluminiumplatte, reicht bei den 1993er-Tests der Fa. SELL GmbH bis unter die Einspannungen des Testaufbaus.

4.4.1.3.3 Vergleichbarkeitsdefizit durch unterschiedlich große Doubler

Die Größe der Doubler für die Pull-Out-Tests (quadratisch) und der Sheartest“ (rechteckig, bis zum Sandwichrand geführt) weichen voneinander ab, dadurch werden faktisch „unterschiedliche Inserts mit unterschiedlich großem Kragen“ getestet. So ist eine gleichzeitige Bewertung eines Inserttyps nach seinen Pull-Out- und Shear-Eigenschaften nicht zulässig, da die Geometrien der Insertverbindungen voneinander abweichen, siehe Abb. 33.

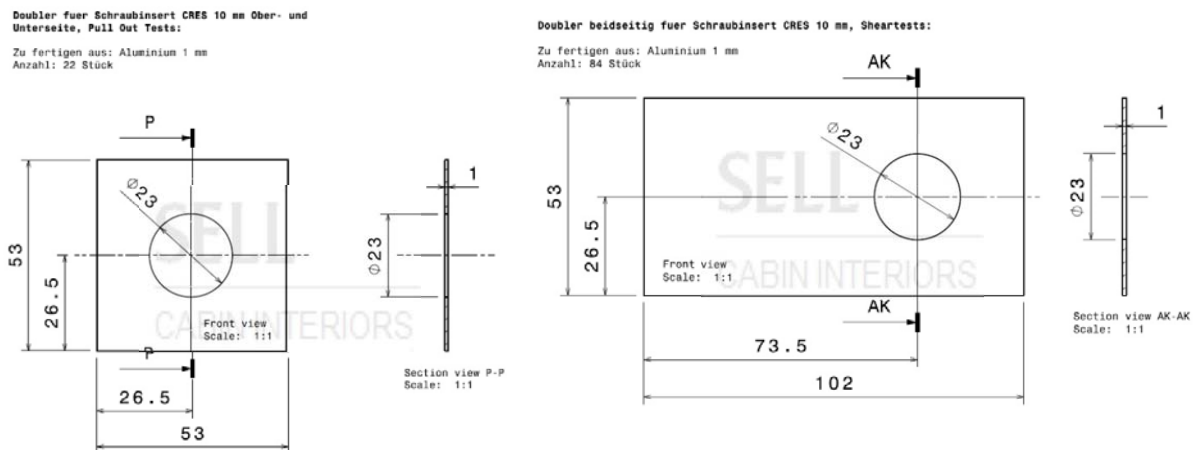


Abb. 98: Unterschiedliche Dimensionen der Doubler (lokale Deckschichtverstärkungen) für die Pull-out- (links) und Shear-Testkörper (rechts) der Schraubinsert im Sandwichtyp 618 HC.

4.4.1.3.4 Nichtbeachtung der Erstversagensformen sowie der Versagensabläufe

Versagt das Insert durch ein kompletten, schlagartigen Ausriss aus dem Sandwichpaneel, bedeutet dies ein Gesamtversagen der Verbindungstelle und kann zu einem schnellen Versagen der Gesamtstruktur der Galley führen. Ein solches schlagartiges Komplettversagen ist aus Sicherheitsgründen unbedingt zu vermeiden.

Löst sich hingegen z. B. zunächst nur der Insertkragen von einer der Deckschichten des Sandwichpaneels, liegt zwar eine Erstschädigung vor, das Insert verbleibt jedoch im Verbund. Bei diesem Teilversagen weist die Insertverbindung eine Resttragfähigkeit auf, so dass die Gesamtstruktur zwar geschädigt ist, aber kein Komplettversagen auftritt. Eine derartige Schädigung mit anschließender Resttragfähigkeit macht die Struktur hingegen „robust“ und ist unbedingt anzustreben.

Diese unterschiedlichen Versagensarten haben sowohl auf die Formgebung des Inserts als auch die Gestaltung der gesamten Verbindungsstelle einen wesentlichen Einfluss.

Bei den Versuchen an den innovativen Inserts war häufig zu beobachten, dass die beschriebenen Versagensarten (Erstschädigung auf mittlerem Lastniveau, anschließend Komplettversagen auf wesentlich höherem Lastniveau, vgl. Abb. 34, Abb. 35 und Abb. 36) in einem sog. „Schädigungsverlauf“ bzw. „-ablauf“ hintereinander eintraten. So ließen sich die Erstschädigungen sehr gut über Knister- und Knackgeräusche sowie über einen ersten kurzen Einbruch in der Kraft-Weg-Kurve identifizieren.

Bei einer derartigen Vorschädigung trägt das Insert bei anschließender Belastung weniger bzw. ist die Struktur der Lasteinleitung geschädigt und verhält sich „weicher“.

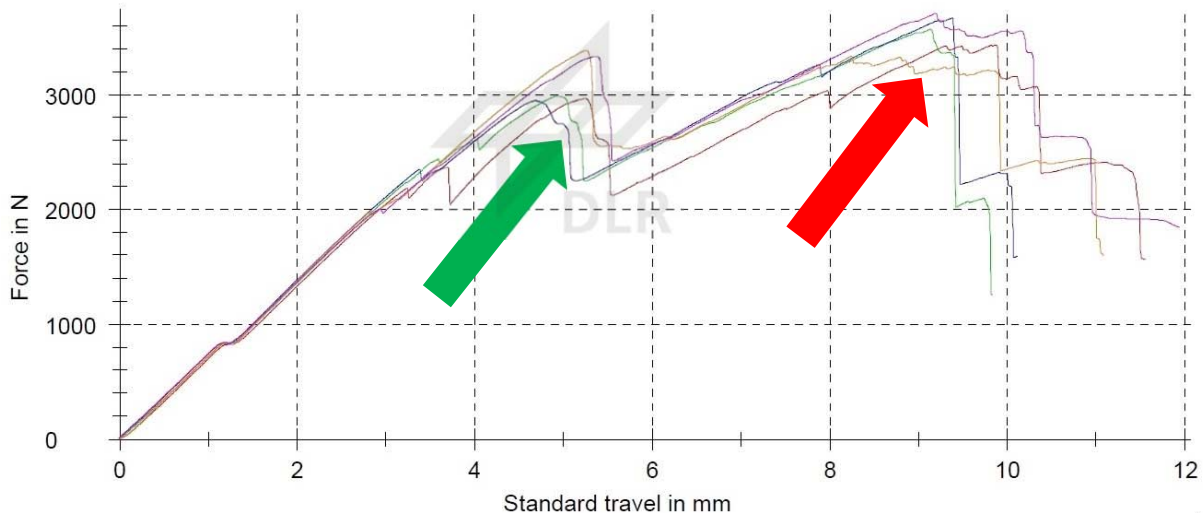


Abb. 99: Kraft-Weg-Verlauf einer Insertverbindung im Pull-Out-Test. Grüner Pfeil: Erstschädigungspeak durch Ablösen der oberen Deckschicht am Rand der Bohrung. Roter Pfeil: Maximallast bei Komplettersagen durch Druckbruch in der unteren Deckschicht des Sandwichpaneels.

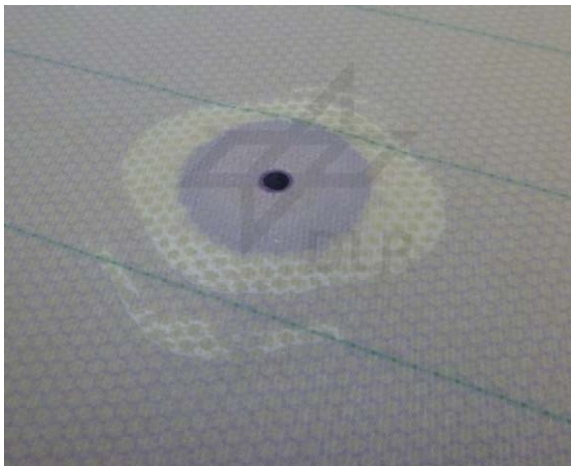


Abb. 100: Erstversagen bzw. Erstschtigung bei einem Lastniveau von ca. 2,4 kN durch Ablösen der oberen Deckschicht bzw. „Abpellen“, vgl. auch Abb. 34, grüner Pfeil. (Probennummer: PO_TI_22mm_01.1_1/12)



Abb. 101: Zweitversagen des Sandwichpaneels durch Druckbruch der unteren Deckschicht bei einem Lastniveau von ca. 3,4 kN, vgl. Abb. 34, roter Pfeil. (Probennummer: PO_TI_22mm_01.1_1/12)

Weder diese Schädigungsabfolge noch die zugehörigen Lastniveaus wurden jedoch in der Dokumentation der 1993er SELL-Tests beachtet, obwohl sie für die Bestimmung der maximalen Auslegungslasten (sog.: „Allowables“ bzw. „allowable loads“) als Designkriterien für Verbindungsstellen von Sandwichstrukturen essentiell sind. Weiterhin wurde von der Fa. SELL GmbH die höchste erreichte Last, Abb. 34, roter Pfeil, als Grundlage für die Berechnung der Allowable Loads genutzt. Es hätte jedoch stattdessen die Lasthöhe der ersten Schädigung („First failure“) als Maßstab für die Berechnung der Insertverbindungsgüte herangezogen werden müssen, Abb. 34, grüner Pfeil). Die Lastangaben der SELL-Dokumente

geben keine Auskunft darüber, ob es nicht bereits bei wesentlich geringeren Lasten eine derartige Vorschädigung der Insertverbindung gab. Daraus resultiert die Gefahr der Unterdimensionierung der Insertverbindungen.

Ein direkter Vergleich zwischen den Ergebnissen der 1993er SELL-Tests zu den aktuellen Tests an den innovativen Insertkonzepten ist damit eigentlich nicht mehr zulässig, da auf der einen Seite die maximalen Versagenslastwerte, auf der anderen Seite die (z. T. wesentlich niedrigeren) Lastwerte bei Erstschädigung als Vergleichsbasis verwendet werden. Wird dennoch verglichen, resultiert eine wesentlich schlechtere Bewertung der mechanischen Leistungsfähigkeit der innovativen Inserts.

Aus den genannten Gründen finden aus den 1993 getesteten Insertverbindungen nur solche Berücksichtigung für den Vergleich zwischen den Standardinserts und den innovativen Inserts, bei denen:

1. Die Insertgrößen im Vergleich zu den Sandwichtestpaneelen recht klein waren, also genügend Abstand zu den Einspannungen des Testaufbaus vorhanden war, so dass das Sandwichpaneel zumindest leicht eine Biegelinie ausbilden konnte.
2. Aus der Versagensbeschreibung hervorgeht, dass die Erstschädigung und das Maximallastversagen auf ähnlich hohem Lastniveau lagen.
3. Keine Doubler benutzt wurde, der unter die Einspannungen des Testaufbaus reichte, vgl. Abb. 32.

4.4.2 Innovative Inserttypen

4.4.2.1 Übersicht Dokumentationsablauf zu den innovativen Insertkonzepten

Alle Tätigkeiten im Projekt InGa zur Gestaltung und Untersuchung der fünf innovativen Insertkonzepte werden im Folgenden dargestellt, die Beschreibungen sind in den folgenden Ablauf untergliedert:

1. Problemstellung in der konventionellen Galley
2. Konzeptentwicklung
3. Festlegung der Testkonfigurationen
4. Sandwichprobekörper
5. Tests an den Insertkonzepten
6. Ergebnisübersicht
7. Leistungsvergleich zu konventionellen Inserts

4.4.3 Topfininsert

4.4.3.1 Problemstellung in der konventionellen Galley

Die T-Stoßverbindungen z. B. bei Fach-Trennwänden werden zurzeit mit Hilfe von geklebten Nut-Feder-Verbindungen realisiert. Das mechanische Verhalten einer Nut-Zapfen-Verbindung ist jedoch sowohl analytisch als auch numerisch schwierig zu erfassen. Zur Darstellung der Nut-Zapfenform müssen beide Sandwichplatten fräsend bearbeitet werden. Bei der Montage ist ein Toleranzausgleich der Sandwichelemente zueinander kaum möglich. Die Verbindung ist für eine Reparatur oder Demontage nur gewaltsam bzw. zerstörerisch trennbar.

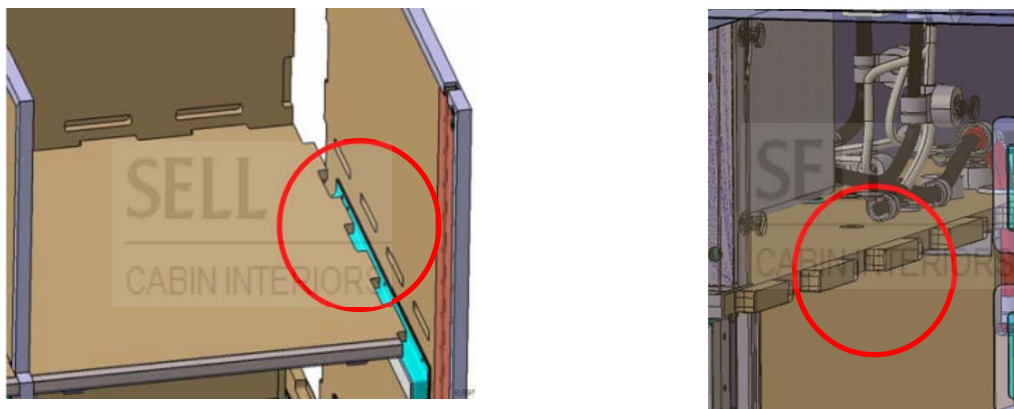


Abb. 102: Feste Installation z. B. eines Compartmentboards in der Galley mit Hilfe von Nut- Zapfen-verbindungen (Mortise-and-tenon) (40).

4.4.3.2 Konzeptentwicklung

In der Sandwichtechnik ist zur Darstellung einer lösbaren Verbindungstechnik der Deckschichteinzug zu finden, bei dem der Kern kegelförmig ausgespart wird und die Deckschicht so in den Ausschnitt drapiert wird, dass beide Deckschichten im Schraubenlochbereich direkt übereinander liegen, siehe Abb. 38. Eine derartige Ausführung einer Krafteinleitung ist mechanisch sinnvoll, jedoch sehr aufwendig herzustellen, da hierfür eine präzise, große Kegelfräsung in den Kern gefräst und die Deckschichtfaserlagen per Hand in diese Kegelfräsung drapiert werden müssen.

Dieses Konzept finden sich in vorteiliger Form im sog. „Topfinser“-Konzept wieder, bei dem der Deckschichtkegel als eigenständiges Bauteil dargestellt wird, das mit der oberen und unteren Deckschicht des Sandwichpaneels verklebt wird, siehe Abb. 41 und Abb. 42.



Abb. 103: Schnitt durch einen Deckschichteinzug als Lasteinleitungspunkt (JFS bzw. „Joint face sheet-Design“).

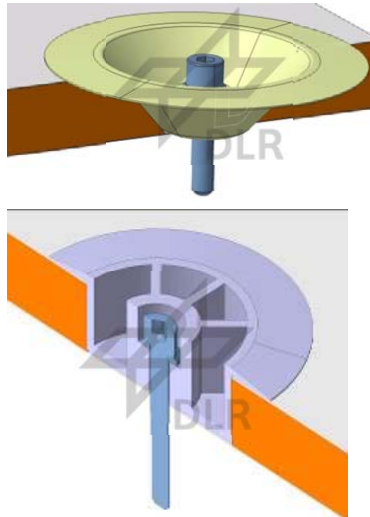


Abb. 104: Iterationsschritte des CAD-Modells des Topfinserts.



Abb. 105: Prototyp des Topfinserkonzepts.

Weiterhin kann das Insert direkt nach der Montage, also noch vor der endgültigen Klebstoffaushärtung, belastet werden. Es besteht die Möglichkeit des Ausgleichs sowohl von Sandwichdicken- als auch von Schraublochpositionstoleranzen.

Es wird eine lösbare Verbindung hergestellt, sodass auf aufwendige Reparaturen, wie sie aus der Nut-Zapfenverbindung resultieren, verzichtet werden kann.

Durch den Einbezug beider Deckschichten wird ein durchgängiger Kraftverlauf gewährleistet. Der Schub wird über die Verrippung des Topfinserts übertragen. Eine geringe Schraubenlänge im Insert reduziert das Gewicht der Verbindung.

Bei entsprechender Formgebung resultierte eine homogene Abnahme der Steifigkeit vom Schraubenbereich bis zum Deckschichtkragen, so dass ein spannungsspitzenfreier Lasttransfer resultiert.

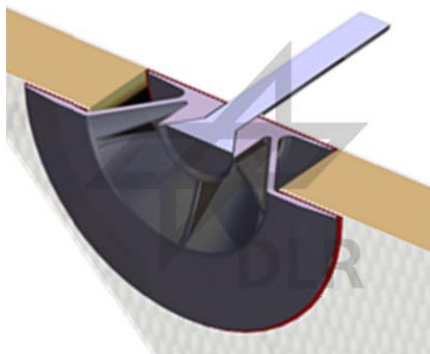


Abb. 106: Parametrisiertes CAD-Modell des Topfinserkonzepts aus Aluminium im Schnitt, Variante für den Sandwichtyp 616 HC.

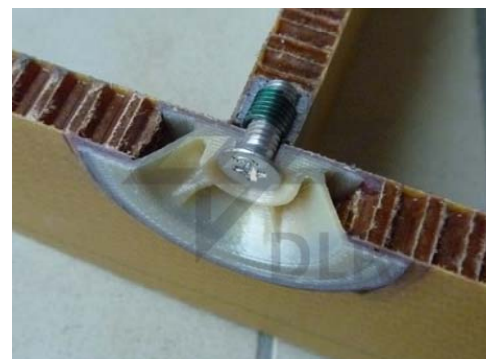


Abb. 107: Schnittdemonstrator des Topfinserkonzepts aus ULTEM 9085, in Sandwichtyp 616 HC.

4.4.3.2.1 Vorteile des Topfinsertkonzepts

Die günstige Herstellung von Kunststoffbauteilen könnte die Verwendung z. B. des luftfahrtzugelassenen PEI-Kunststoffs „ULTEM 9085“ der Fa. Sabic interessant machen. Der Montageaufwand des Topfinsets ist verglichen mit dem einer Nut-Zapfen-Verbindung oder dem beschriebenen Deckschichteinzug gering, da im Sandwich nur eine Bohrung vorzusehen ist. Weiterhin kann das Inserts direkt nach der Montage, also noch vor der endgültigen Klebstoffaushärtung, belastet werden. Es besteht die Möglichkeit des Ausgleichs sowohl von Sandwichdicken- als auch von Schraublochpositionstoleranzen.

Es wird eine lösbare Verbindung hergestellt, sodass auf aufwendige Reparaturen, wie sie aus der Nut-Zapfenverbindung resultieren, verzichtet werden kann.

Durch den Einbezug beider Deckschichten wird ein durchgängiger Kraftverlauf gewährleistet. Der Schub wird über die Verrippung des Topfinsets übertragen. Eine geringe Schraubenlänge im Insert reduziert das Gewicht der Verbindung. Bei entsprechender Formgebung resultierte eine homogene Abnahme der Steifigkeit vom Schraubenbereich bis zum Deckschichtkragen, so dass ein spannungsspitzenfreier Lasttransfer resultiert.

4.4.3.2.2 Edelstahlvarianten des Topfinsets

Die Herstellung der CRES-Varianten der Topfinsets (CRES = Corrosion resistant steel = Edelstahl) im Prototypverfahren „Laserschmelzen“ stellte sich als problematischer heraus als zunächst angenommen. So ließen sich keine ausreichend ebenen Kragen herstellen, da sich durch den Wärmeverzug die Ränder der oberen Kragen stark aufstellten, vgl. Abb. 43.

Eine Möglichkeit zur Fertigung eines ebenen Kragens ist die Herstellung des oberen Kragens im Übermaß und ein anschließendes Abdrehen, siehe Abb. 44.



Abb. 108: Aufstellen des oberen Kragens bei fehlender Stützung, Bsp. Topfinset CRES 22mm-Variante.



Abb. 109: Herstellung eines ebenen Kragens durch Abdrehen von Übermaßmaterial.

Da das Abdrehen der oberen Kragen jedoch aufwendig und zeitintensiv ist, wurde auf diese Möglichkeit verzichtet und eine Abstützung der oberen Kragen während der prototypischen Herstellung mit Hilfe einer Stützkonstruktion vorgenommen, um das Aufwellen der Kragen zu verhindern.

Die richtige Form der Stützkonstruktion musste ebenfalls in mehreren Iterationsschritten angepasst werden, siehe Abb. 45 sowie Abb. 46.



Abb. 110: Topfininsert CRES mit teilweise entfernter Stützkonstruktion, erste Version.



Abb. 111: Topfininserts inkl. der endgültigen Form der Stützkonstruktion.

Aufgrund der Herstellungsprobleme kam es zu einer Verzögerung der Lieferung der CRES-Topfininsertprototypen, die ersten Muster der endgültigen Ausführung liegen jedoch bereits vor, siehe Abb. 47. Zur besseren Anhaftung des Klebstoffs sowie zur Egalisierung der Oberfläche werden die Insertprototypen nach der Herstellung mit Edelmetall sandgestrahlt.



Abb. 112: CRES -Varianten der Topfininserts mit 10 mm und 22 mm Höhe (für die Sandwichtypen 616 HC und 618 HC).



Aufgrund der Herstellungsschwierigkeiten von CRES-Inserts im RP-verfahren wurde diese Materialvariante nicht weiter verfolgt. Eine Herstellung der für die Tests notwendigen Anzahl wäre im vorgegebenen Zeitrahmen nicht möglich gewesen.

4.4.3.2.3 Aluminiumvarianten des Topfinserts

Die Aluminiumvarianten des Topfinserts wurden beim DLR SHT in Köln in einem kombinierten spanabhebenden Verfahren aus dem Aluminiumwerkstoff EN-AW-7022 gefertigt. Dabei wurde zunächst die Außenkontur auf einer CNC-Dreh-Fräskombianlage gedreht und anschließend die Rippen mit einem Mikrofräser freigestellt. Die zu verklebenden Flächen wurden im Anschluss durch Sandstrahlen mit Edelkorund (EKW-F 90, 106-250 μm Korngröße) aufgeraut. Die Rautiefen, die auf dem Protokoll angegeben sind ($R_a = 1,8 \mu\text{m}$, $R_z = 10,5 \mu\text{m}$) sind sehr gut zum Verkleben geeignet, siehe Abb. 48.



Abb. 113: Aluminiumvariante des 22 mm-Topfininsertkonzepts, hergestellt im kombinierten CNC-Dreh-Fräsverfahren.

4.4.3.2.4 Kunststoffvarianten des Topfinserts

Die Kunststoffvarianten des Topfinserts wurden bei der Fa. AlphaCAM im Rapid-Prototyping-Verfahren „SLS“ aus dem Kunststoff ULTEM 9065 hergestellt, siehe Abb. 43.

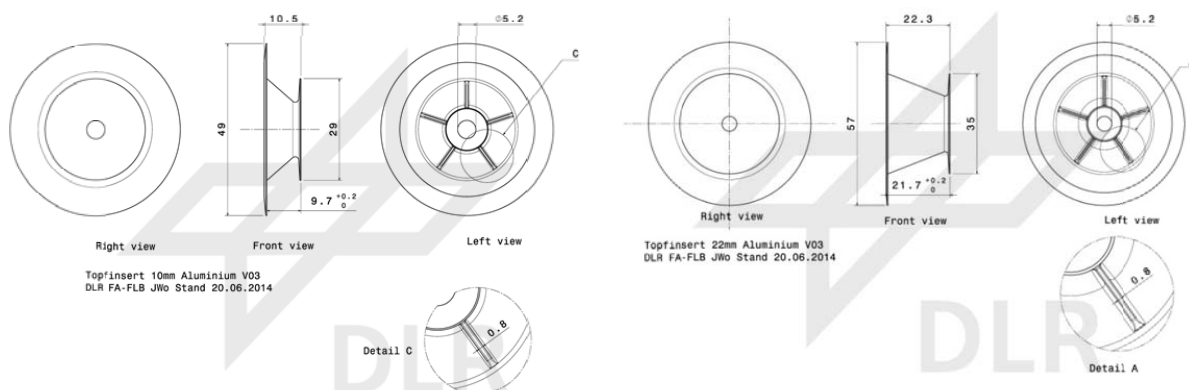


Abb. 114: Bilder Kunststoffvariante des 10 mm- und 22 mm-Topfinserts, hergestellt im Rapid-Prototyping-Verfahren „SLS“ aus ULTEM 9085.

Sobald die Testsandwichpaneele bei der Fa. SELL GmbH gefertigt wurden, wurden die innovativen Kunststoffinserts in diese eingeklebt. Durch die Verwendung des Kunststoffs ULTEM 9085 statt Aluminium konnte bei der 22 mm-Variante ein Gewicht von 5,7 g bzw. 40,5 %, bei der 10 mm-Variante ein Gewicht von 4,03 g bzw. 54,7 % eingespart werden.

4.4.3.3 Festlegung der zu testenden Insertkonzepte

Aufgrund der Schwierigkeiten mit der Herstellung von Stahlvarianten mit Hilfe des Rapid-Prototyping-verfahrens wurden die Alu- und Kunststoffvarianten des Topfinserterkonzepts weiterverfolgt und Tests unterzogen. Daher werden im Folgenden nur die Dimensionsmaße sowie Bilder dieser Topfinserterprototypen dargestellt.



Dimensionsmaße des Insertprototyps Topfinserter Al, 10 mm (für Sandwichtyp 616 HC).

Abb. 115: Dimensionsmaße des Insertprototyps Topfinserter Aluminium, 22 mm (für Sandwichtyp 618 HC).

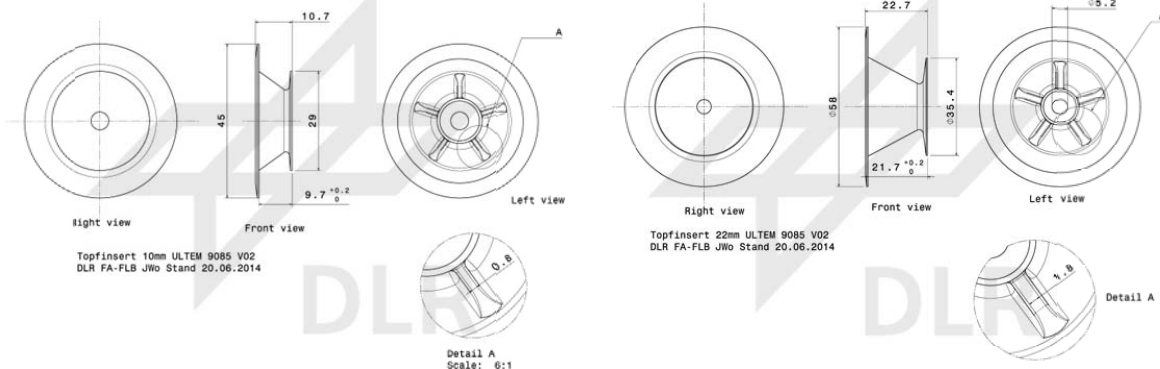


Abb. 116: Dimensionsmaße des Insertprototyps Topfinserter ULTEM 9085, 10 mm (für Sandwichtyp 616 HC).

Dimensionsmaße des Insertprototyps Topfinserter ULTEM 9085, 22 mm (für Sandwichtyp 618 HC).

4.4.3.4 Festlegung der Testkonfigurationen

Variiert und getestet wurden die folgenden Parameter:

1. Testarten: 2 (Pull-Out und Sheartests)
2. Konzeptanzahl: 2 (Alu- und Kunststoffmaterial)
3. Sandwichtypen: 2 (SELL-Bezeichnung 616 HC, 10 mm Gesamthöhe sowie 618 HC, 22 mm Gesamthöhe)
4. Verstärkungstypen: 2 (unverstärkt und mit Verstärkungsdoubler zugseitig)
5. Anzahl der Proben pro Konfiguration: 5

Damit ergibt sich der folgende Probenumfang:

$$2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5 = 80 \text{ Probekörper} \quad [-] \quad (2)$$

4.4.3.5 Topfininsert-Sandwichprobekörper

4.4.3.5.1 Dimensionierung

Die Dimensionierung der Probekörper erfolgte mit dem in Abschnitt 2.5.2 beschriebenen Verfahren. Folgend sind einige Beispiele für die Dimensionen der Testkörper dargestellt. Die Abmaße aller Probekörpervarianten für das Topfininsertkonzept können dem Dokument „2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx“ entnommen werden.

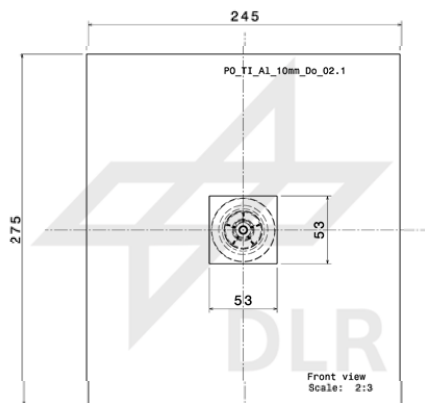


Abb. 117: Dimensionsmaße Pull-Out-Testpaneel, 616 HC, 10 mm, Aluminium – und ULTEM 9085-Varianten des Topfininsertkonzepts.

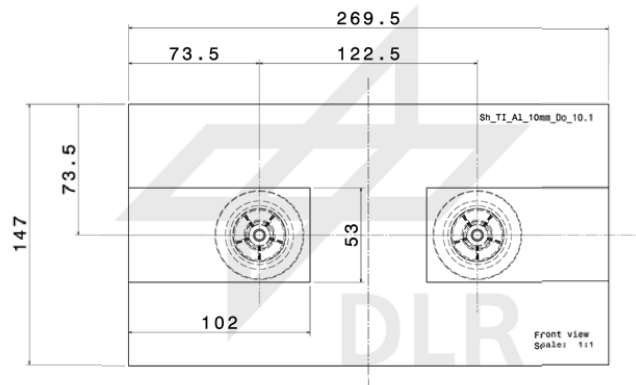


Abb. 118: Dimensionsmaße Shear-Testpaneel, 616 HC, 10 mm Aluminium – und ULTEM 9085-Varianten des Topfininsertkonzepts.

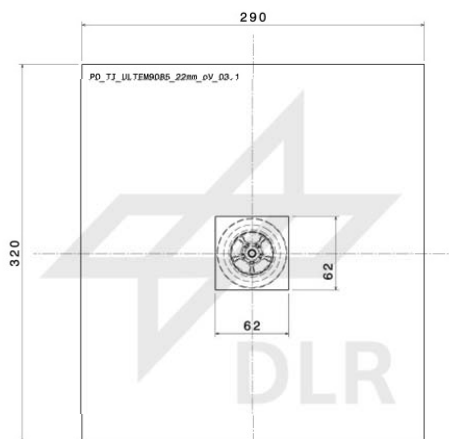


Abb. 119: Dimensionsmaße Pull-Out-Testpaneel, 618 HC, 22 mm, Aluminium – und ULTEM 9085-Varianten des Topfininsertkonzepts.

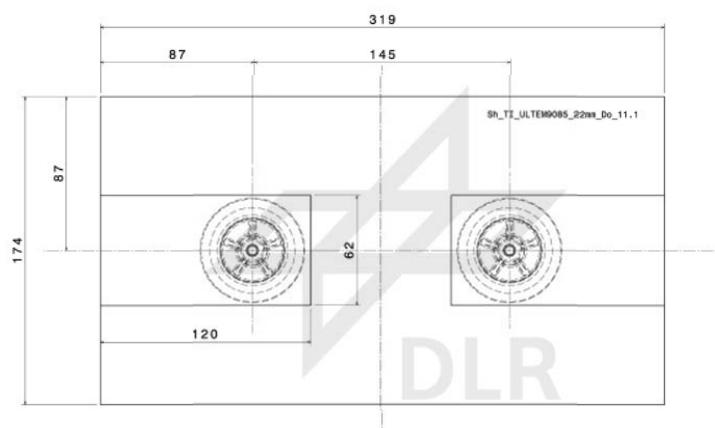


Abb. 120: Dimensionsmaße Shear-Testpaneel, 618 HC, 22 mm Aluminium – und ULTEM 9085-Varianten des Topfininsertkonzepts.

4.4.3.5.2 Fertigung

Reinigung und Vorprüfung der Sandwichpaneele

Die Sandwichrohpaneele zum Aufbau der Probekörper für die innovativen Inserts wurden von der Fa. SELL GmbH zur Verfügung gestellt.

Die Sandwichrohpaneele wurden auf Transportschäden hin überprüft.

Die anschließende Reinigung der Sandwichpaneele erfolgte durch Absaugen des Sägestaubs und Abwischen der zu verklebenden Bereiche mit Aceton getränkten, fusselfreien Papiertüchern. Bei der Fa. SELL GmbH wird statt Aceton das Produkt „Metaclean“ zur Vorbehandlung eingesetzt, nach Absprache mit der Fertigung der Fa. SELL GmbH sind die Reinigungswirkungen jedoch vergleichbar und haben auf die Versuchsergebnisse keinen relevanten Einfluss.

Die Absprache über die Oberflächenreinigung erfolgte für die Probekörperfertigung zu spät, so dass die zu verklebenden Oberflächen der Sandwichpaneele der Topfininsert-Sandwichtestkörper vor der Verklebung nicht vorbehandelt wurden. Dadurch bedingte, frühzeitige Versagen der Verklebungen wurden jedoch bei den Versuchen nicht festgestellt, so dass dieser Einfluss als vernachlässigbar angesehen wird.

Verklebung der Topfininserts

Die Topfininsertprototypen aus Aluminium sowie aus Kunststoff (ULTEM 9085) wurden in die von der Fa. SELL GmbH zur Verfügung gestellten Sandwichprobekörper der Typen 616 HC und 618 HC eingeklebt.

ein Erstversagen, so dass der Einfluss auf die Testergebnisse vernachlässigt wird.

Das Anpressen des Klebstoffs zur Befestigung des Topfininserts erfolgte durch Anzug einer Durchgangverschraubung. Die Mutter wurde auf der oberen Deckschicht für eine möglichst flächige Kraftverteilung auf einer Karosseriemutter aufgeschraubt, siehe Abb. 56.

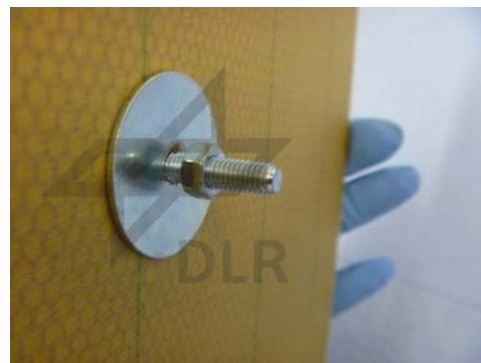


Abb. 121: Fixierung und Verpressen der Topfininserts zur Aushärtung des Klebstoffs per Durchgangsschraube, Mutter und Kotflügelscheibe (M5 x 35 mm).

Beschriftung der Probekörper

Eine anschließende, beidseitige Beschriftung der Insert-Sandwichtestkörper erfolgte nach dem in Abschnitt 2.5.2.2 dargestellten Schema auf dem Randbereich der Sandwichpaneele.

Auswiegen der Insertkonzepte

Die Massen der aktuellen Schraubinsertprototypen wurden durch Auswiegen ermittelt.

Auswiegen der Gesamtprobekörper

Die fertigen Probekörper wurden ausgewogen, vgl. auch Abschnitt 2.6.4, Seite 183.

4.4.3.6 Tests der Topfinserterkonzepte

Es wurden sowohl transversale („Pull-Out“) als auch flächenparallele („Shear“) Belastungstests an den Topfinserterkonzepten durchgeführt. Die Testgrundlagen und Voraussetzungen, der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die Dokumentation der Tests per Kraft-Weg-Messung, Video und Fotoaufnahmen sowie Mitschriften wird in Abschnitt 2.5.5, ab Seite 179 näher erläutert.

4.4.3.6.1 Testergebnisse

Die Testergebnisse (die aufgenommenen Kraft-Weg-Kurven) für die Pull-Out- und die Sheartests können dem entsprechenden Testbericht entnommen werden.

4.4.3.6.2 Festigkeitsberechnung unter transversaler und flächenparalleler Belastung

Die Berechnung der Festigkeiten der Topfinserterkonzepte unter transversaler als auch flächenparalleler Belastung aus den Rohdaten erfolgte nach der in Abschnitt 2.5.6 dargestellten Vorgehensweise, Ergebnisse siehe Tab. 11 sowie Tab. 12.

4.4.3.6.3 Berechnung der Mittelwerte der Maximallasten, statistische Auswertung

Das allgemeine Vorgehen ist in Kapitel 2.5.6 beschrieben, Ergebnisse für die Topfinserterkonzepte: siehe Tab. 11 sowie Tab. 12.

4.4.3.6.4 Massenbestimmung der Einzelkomponenten

Die Gewichtsbestimmung der Einzelteile der Insertlasteinleitungen mit Topfinserterkörpern erfolgte nach dem in Kapitel 2.6 beschriebenen Verfahren.

4.4.3.6.5 Bestimmung der Verbindungsgüten der Topfinsertervarianten

Die Verbindungsgüten wurden unter Nutzung der aus den Testergebnissen berechneten Festigkeiten sowie der Massen berechnet, das allgemeine Vorgehen ist in Abschnitt 2.6, ab Seite 181 beschrieben. Die Ergebnisse für die Topfinserterkonzepte sind in Tab. 11 sowie Tab. 12 dargestellt.

4.4.3.7 Ergebnisübersicht

In den folgenden beiden Tabellen sind die mittleren Festigkeiten, Massen sowie Verbindungsgüten der Topfinserterkonzepte zusammengefasst dargestellt, dies unter transversaler Belastung (Tab. 11) bzw. flächenparalleler Belastung (Tab. 12).

Weiterführende Informationen sind dem Dokument zu entnehmen:

„Zerlik_R_Testreport_Innovative_Inserts_K-1156ALL-1001-22_SELL_Rev_new.docx“

Die Informationen zu den mittleren Versagenslasten sind den Dokumenten zu entnehmen:

„F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FTr\02_Results_clean_innov_Inserts_2014“

Die Informationen zu den Massenberechnungen sind den Dokumenten zu entnehmen: „2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx“

Insertkonzept	Topfiniserts			
Insertmaterial	Alu	Alu	ULTEM 9085	ULTEM 9085
Sandwichtyp	616 HC (10 mm)	618 HC (22 mm)	616 HC (10 mm)	618 HC (22 mm)
Ohne Verstärkung				
Mittlere Versagenslast	2130 N	2748 N	1367,7 N	1964,6 N
Gesamtgewicht	8,879 g	15,335 g	4,745 g	10,156 g
Verbindungsgüte	234 N/g	179,2 N/g	288,2 N/g	193,4 N/g
Mit Verstärkung auf der Lastzugewandten Seite („Doubler oben“)				
Mittlere Versagenslast	2359,8 N	4644 N	2858,2 N	3513,6 N
Gesamtgewicht	17,639 g	27,352 g	13,373 g	22,17 g
Verbindungsgüte	133,9 N/g	169,8 N/g	213,7 N/g	158,5 N/g

Tab. 16: Verbindungsgüte der Topfiniserts unter transversaler (Pull-Out) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte. Schraube NAS 514-40, ca. 4,83 mm Schaftdurchmesser)⁵

Insertkonzept	Topfiniserts			
Insertmaterial	Alu	Alu	ULTEM 9085	ULTEM 9085
Sandwichtyp	616 HC (10 mm)	618 HC (22 mm)	616 HC (10 mm)	618 HC (22 mm)
Ohne Verstärkung				
Mittlere Versagenslast	10512,1 N	10817 N	4542,4 N	8213,8 N
Gesamtgewicht	8,541 g	16,061 g	5,014 g	10,62 g
Verbindungsgüte	1230,8 N/g	673,5 N/g	905,9 N/g	773,4 N/g
Mit Verstärkung auf der Lastzugewandten Seite („Doubler oben“)				
Mittlere Versagenslast	13793,12 N	14204,1 N	11028,5 N	12562,6 N
Gesamtgewicht	32,58 g	39,964 g	29,277 g	43,998 g
Verbindungsgüte	423,3 N/g	355,4 N/g	376,6 N/g	285,5 N/g

Tab. 17: Verbindungsgüte der Topfiniserts unter flächenparalleler (Shear) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte. Schraube NAS 517-4-11 1/4"-28, (ca. 6,35 mm Schaftdurchmesser)⁶

⁶ Quellen:

F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FTr02_Results_clean_innov_Inserts_2014

Mittlere Gewichte: 2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx

4.4.3.8 Leistungsvergleich zu konventionellen Inserts

Die Topfinsertkonzepte (ohne Doublerversärkung) zeigten unter transversaler (Pull-Out) Belastung Verbindungsgüten zwischen 133 – 288 N/kg und liegen damit im Mittelfeld der Standardinserts, Abb. 57.

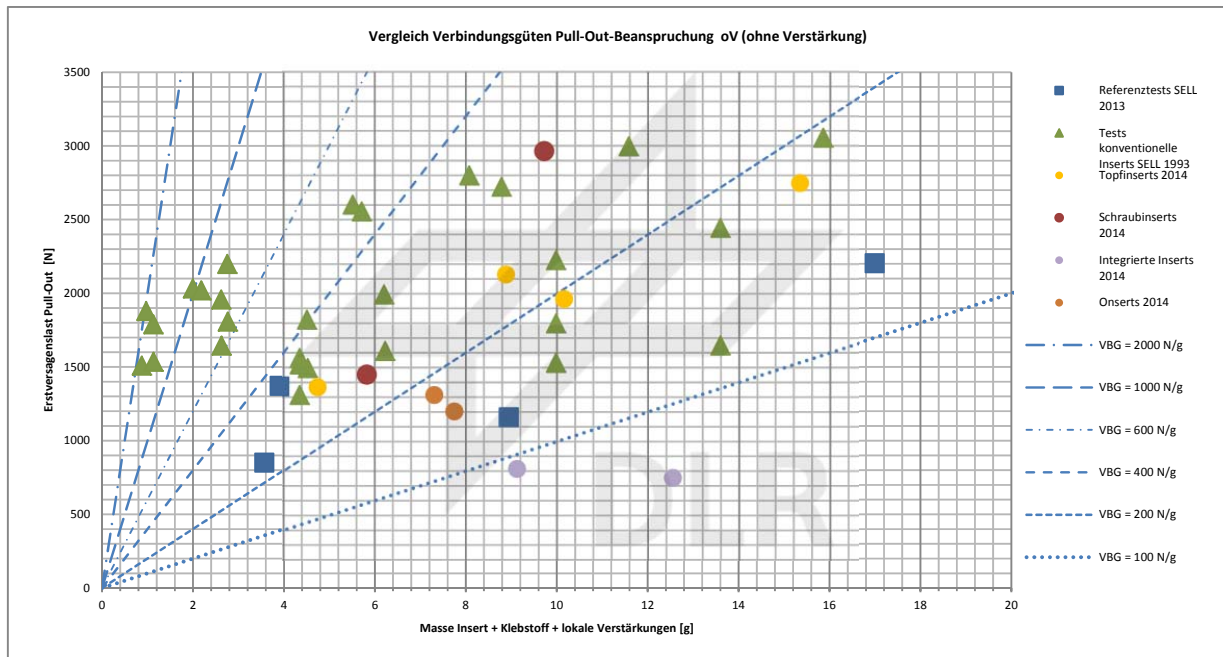


Abb. 122: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter transversaler Belastung (Pull-Out).⁷

⁷ Quelle: 2015-05-04_InGa_Pull_Out-Werte_P_m_konv+inno_Inserts_v01_JWo.xlsx
Quelle: 2015-05-05_InGa_Shear-Werte_P_m_konv+inno_Inserts_v02_JWo.xlsx

Die Topfinserterkonzepte (ohne Doublerversärkung) zeigten unter flächenparalleler („Shear“) Belastung Verbindungsgüten zwischen 773,4 – 1230,8 N/kg und liegen damit z. T. auf dem Niveau der besten Standardinserts, Abb. 58.

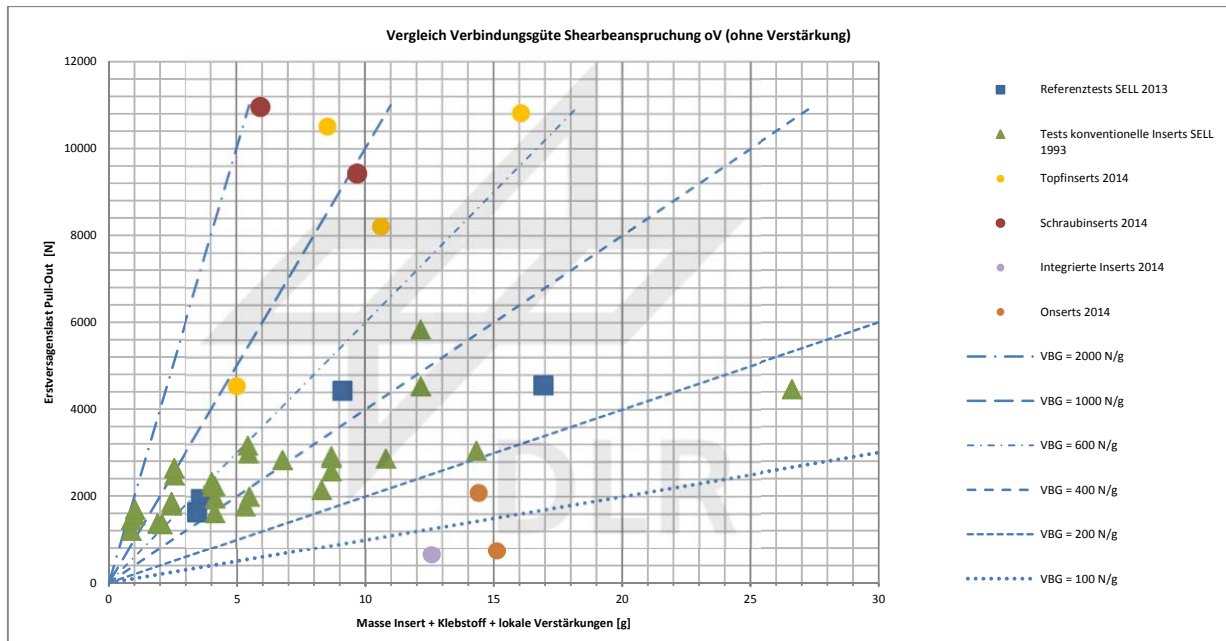


Abb. 123: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter flächenparalleler Belastung (Shear).⁸

4.4.3.9 Anfertigung von Schnittdemonstratoren sowie Installation in der Demonstratorgalley

Es wurden Schnittdemonstratoren mit Topfinserterverbindungen angefertigt sowie Topfinserts in der Demonstratorgalley des Projekts InGa installiert, siehe Abschnitt 2.8 ab Seite 185.

⁸ Quelle: 2015-05-04_InGa_Pull_Out-Werte_P_m_konv+inno_Inserts_v01_JWo.xlsx

4.4.3.10 Lessons learned: Weiterentwicklungsempfehlungen

4.4.3.10.1 Änderung der Schraubengröße

Der zunächst zur Verwendung gekommene Schraubentyp NAS 514 mit einer Gewindegröße 10-32 UNF (bzw. einem Schaftdurchmesser von ca. 4,8 mm) stellte sich bei den Sheartests der Aluminium-Topfinsets in den 616 HC-Sandwichpaneelen als zu dünn heraus, es resultierte ein frühzeitiges Versagen des Schraubenschafts durch Abscheren, siehe Abb. 59. Daher wurde die nächstgrößere zur Verfügung stehende Schraubentyp NAS 517 mit einer Gewindegröße von 1/4"-28 UNF verwendet (Schaftdurchmesser ca. 6,35 mm). Dafür mussten die Stecklöcher aller Topfinsets in den Shearproben auf einen Durchmesser von 7 mm aufgebohrt werden, siehe Abb. 60. Die auch am Schraubenkopf größeren Schrauben des Typs NAS 517- 1/4"-28 UNF passten jedoch ebenfalls in die Kegelsitzaufnahmen der Topfinsets, da diese bereits im Vorherin hinreichend groß dimensioniert wurden.

Für zukünftige Weiterentwicklungen der Topfinsetkonzepte wird empfohlen, im Konstruktionsprozess eine der maximalen Schublasten angemessene Schraubengröße zu berücksichtigen.



Abb. 124: Versagen der Schraube der Größe NAS 514 10-32 (4,8 mm Schaftdurchmesser) auf Scherung unter flächenparalleler Belastung.



Abb. 125: Aufbohren des Stecklochs auf 7 mm zur Aufnahme von Schrauben der Größe NAS 517 1/4"-28 UNF (Schaftdurchmesser ca. 6,35 mm).

4.4.3.10.2 Änderung Schraubenkopfform

Es wird eine Änderung der Schraubenkopfform zu Köpfen mit flacher Auflage empfohlen, da diese (bei entsprechend großem Durchmesser der Schraubenlochbohrung) radial etwas Toleranz der Schraubenposition zulassen. Die aktuell zur Verwendung kommenden Kegelschrauben sind zwar etwas gewichtseffizienter, zentrieren sich aber durch den Kegelsitz automatisch genau in der Mitte der Schraubenlochbohrung. Dadurch kann kein ein flächenparalleler, radialer Toleranzausgleich von z. B. leichten Positionsabweichungen der Gewindebohrung des zu befestigenden Elements erfolgen. Dies ist besonders bei Reihenverschraubungen unbedingt notwendig, vgl. auch Abb. 62.

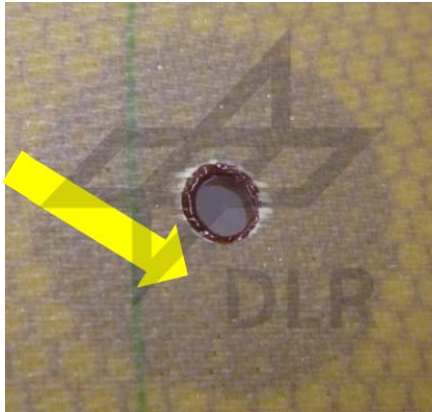


Abb. 126: In die Zentralbohrung eingedrungener Klebstoff.

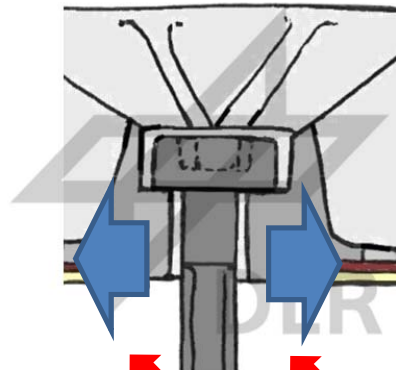


Abb. 127: Zylinderabsatz zur Vermeidung von Klebstoff in der Zentralbohrung (rote Pfeile). Verwendung einer Schraube mit flacher Kopfauflege in Übermaßsteckloch für radialen Toleranzausgleich (blaue Pfeile).

4.4.3.10.3 Änderung der Topfwandhöhe

Durch Wabenreste auf der Innenseite der oberen Deckschicht (bzw. im Bohrlochgrund) konnten die Topfinsets nicht tief genug in das Sackloch eingedrückt werden, wodurch der obere Kragen der Topfinsets einen etwas zu großen Abstand zur Außenseite der unteren Deckschicht zeigten, siehe Abb. 63 sowie Abb. 64. Dieser Spalt musste mit Klebstoff aufgefüllt werden, was in einer zu großen Klebstoffschichtstärke resultierte (vgl. auch Abschnitt 2.3.2.1, Seite 77). Bei den Tests zeigte jedoch keines der Topfinsets an diesen Klebestellen eine Schädigung. Bei zukünftigen Topfinsetversionen sollte eine geringere Höhe der „Topfwände“ der Topfinsets bzw. eine etwas geringerer Abstand der Kragen zueinander in die Formgebung resultieren.

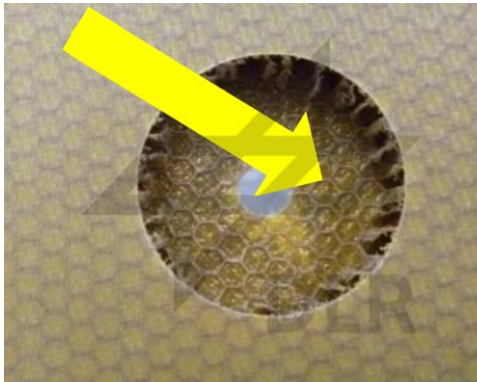


Abb. 128: Reste der Kernwaben auf der Innenseite der oberen Deckschicht.



Abb. 129: Zu großer Abstand des unteren Kragens der Topfinsets von der Oberseite der unteren Deckschicht.

4.4.3.10.4 Ergänzung eines zusätzlichen Absatzes zur Vermeidung von Klebstoffeintritt

Bei den getesteten Topfinsetkonzepten zeigte sich, dass durch das Eindrücken des Inserts in das Sackloch häufig flüssiger Klebstoff in die Zentralbohrung eindrang. Nach dem Aushärten des Klebstoffs musste dieser durch Nachbohren der Zentralbohrung entfernt werden, siehe Abb. 61.

In zukünftigen Versionen der Topfinsets sollte ein Absatz integriert werden, der ein Eindringen des Klebstoffs in die Zentralbohrung verhindert, vgl. Abb. 62.

4.4.3.10.5 Änderung des Zentralkegelwinkels zu einem Zentralzylinder mit Kernanbindung

Da die im Projekt InGa entwickelten Insertkonzepte nur einen Teil eines umfassenderen Prüfprogramms darstellen, bei dem es um die Beurteilung der Einflussgrößen der Eizellastpfade (Anbindungsstellen) von Inserts in das Sandwichpaneel untersucht werden, weisen die Topfinsets keine Verbindung zum Kern auf, um diese Einflussgröße zu eliminieren. Zukünftige Weiterentwicklungen des Topfinsets sollten diesen Lastpfad jedoch mitnutzen, so dass statt der kegligen eine zylindrische Zentralzylinderform empfohlen wird, vgl. Abb. 59.

Alternativ könnte bei den getesteten Topfinsetgeometrien der Hohlraum zwischen den kegeligen Wänden und den Kernwaben mit einem expandierenden Schaum ausgefüllt werden, um gewichtseffektiv eine zusätzliche Kernanbindung zu generieren, vgl. Abb. 65.

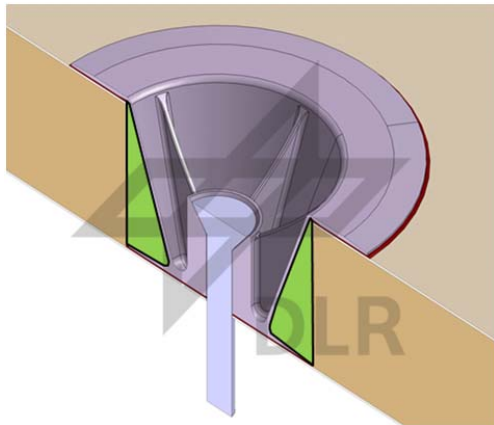


Abb. 130: Mit z. B. aufgeschäumtem Epoxidharz gefüllter Hohlraum zwischen Topfinset und Sandwichkern zur Nutzung der Kernanbindung als zusätzlichen Lastpfad.

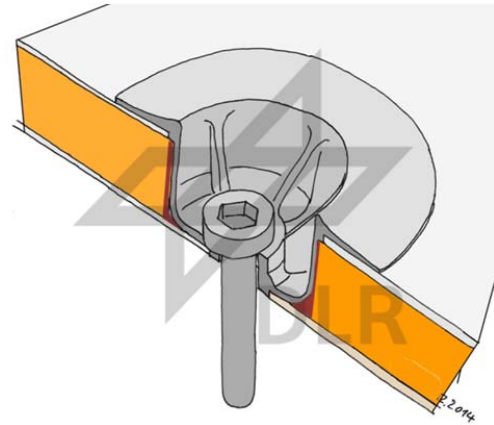


Abb. 131: Vorschlag für Weiterentwicklung des Topfinsets: Vertikale Ausrichtung der Topfwände, Anschluss der Topfwände an den Sandwichkern durch eine möglichst geringe Klebstoffmenge.

4.4.4 Schraubinsert

4.4.4.1 Problemstellung in der konventionellen Galley

Zur Befestigung der gesamten Galley im Flugzeug sind im Deckensandwichpaneel Aluminiumgabeln vorgesehen (siehe Abb. 67, „Deckenbefestigung“). Um die hohen Kräfte in die Sandwichstruktur zu leiten zu können, werden in den Sandwichkern unter den Aluminiumgabeln massive Aluminiumfüllstücke eingesetzt. Die Aluminiumgabeln werden mit sog. Keenserts (bzw. „HeliCoil“-Einsätzen) mit den Aluminiumfüllstücken verschraubt. Die Aluminiumfüllstücke sind sehr gewichtsintensiv und stellen an den Übergängen zum Insertkern einen starken Steifigkeitssprung dar, der lokal zu hohen Spannungskonzentrationen führen kann.

Weiterhin werden die konventionellen Inserts 0127-0054-00000 und 0127-0015-00000 (für die 10 mm bzw. 22 mm-Sandwichstandards), die zur Befestigung von Öfen an den Sandwichpaneelen dienen durch Schraubinserts ersetzt, da sie geringe VBG aufweisen.

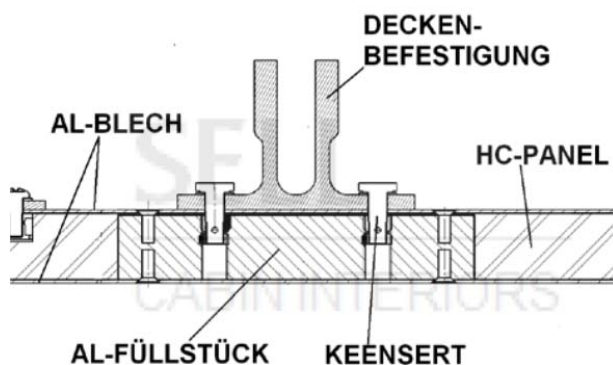


Abb. 132: Massiver Aluminiumblock inkl. sog. Keenserts (HeliCoil-Einsätze) als Krafteinleitung (41).

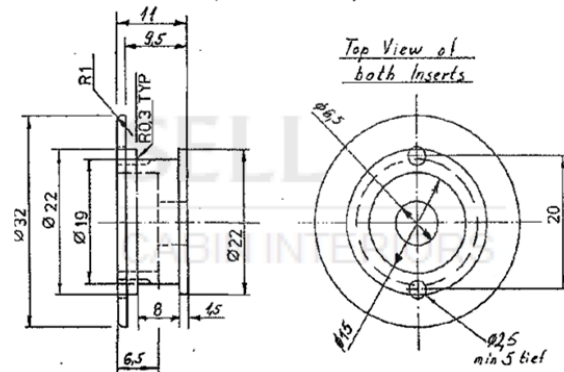


Abb. 133: Das zu ersetzende, konventionelle Insert 0127-0054-00000 für 10 mm-Sandwichplatten (36).

4.4.4.2 Konzeptentwicklung

Zwei gegeneinander verschraubte und damit vorgespannte Inserthälften nehmen die Schraubenklemmkraft auf, das Sandwich erfährt nur eine definierte, geringe Klemmkraft durch die Verschraubung der beiden Inserthälften untereinander. Durch diese können Höhenunterschiede der Sandwichplatte ausgeglichen werden. Das Insert wird in eine übergroße Bohrung eingesetzt, so dass die Lochränder nicht auf Lochleibung belastet werden und ein Toleranzausgleich der Schraubenposition durch Verschieben in der Bohrung in der Montagephase (vor Aushärten des Klebstoffs) möglich ist. Durch die weit überlappenden Kragen wird eine gute Lasteinleitung in die Sandwichdeckschichten erzielt.

Die Formgebung der Kragen sorgt für eine stetige Steifigkeitsabnahme von der Verschraubung bis zum Kragenrand, durch die eine Lasteinleitung in die Deckschichten ohne Spannungsspitzen erzeugt wird, siehe Abb. 69 und Abb. 70.

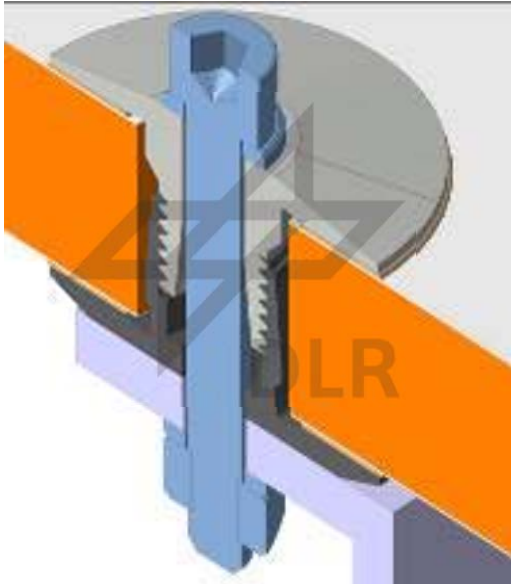


Abb. 134: CAD-Modells des Schraubinserts

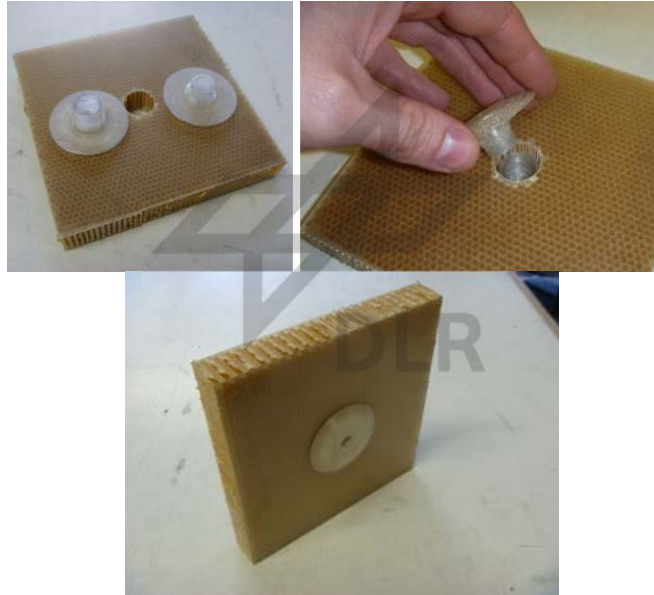


Abb. 135: Montage eines Schraubinsertprototyps.

4.4.4.2.1 Vorteile des Schraubinsertkonzepts

Der Montageaufwand der Schraubinserts ist im Vergleich zur Installation des Aluminiumfüllstücks gering, da die Schraubinserts nach dem Bohren einfacher Durchgangslöcher bereits im Sandwichpaneel installiert werden können. Ein Toleranzausgleich der Sandwichstärke und der Insertposition ist möglich, so lange der Klebstoff noch nicht ausgehärtet ist.

Von der Substitution des Aluminiumfüllstücks durch mehrere Inserts wird darüber hinaus eine starke Gewichtsreduktion sowie Materialersparnis erwartet. Auch durch den Einsatz von Schraubinserts statt konventioneller Inserts in z. B. Sandwich-T-Stoßverbindungen wird eine deutlich einfachere Montage sowie eine deutliche Gewichtsersparnis erwartet.

4.4.4.2.2 Schraubinserts aus Aluminium

Die Einzelteile der Schraubinserts wurden beim DLR SHT spanabhebend (drehend) aus dem Aluminiumwerkstoff EN-AW-7022 gefertigt. Die zu verklebenden Flächen wurden im Anschluss durch Sandstrahlen mit Edelkorund (EKW-F 90, 106-250 μm Korngröße) aufgeraut. Die Rautiefen ($R_a = 1,8 \mu\text{m}$, $R_z = 10,5 \mu\text{m}$) sind sehr gut zum Verkleben geeignet, siehe Abb. 71 bis Abb. 73.

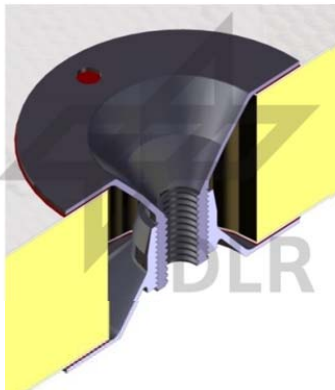


Abb. 136: Parametrisiertes CAD-Modell der 22 mm-Variante des Schraubinsertkonzepts im Schnitt.



Abb. 137: Endgültige Ausführung der Einzelteile der Schraubinserts aus Aluminium, 22 mm-Variante, hergestellt im spanabhebenden Verfahren (CNC-gesteuertes Drehen).

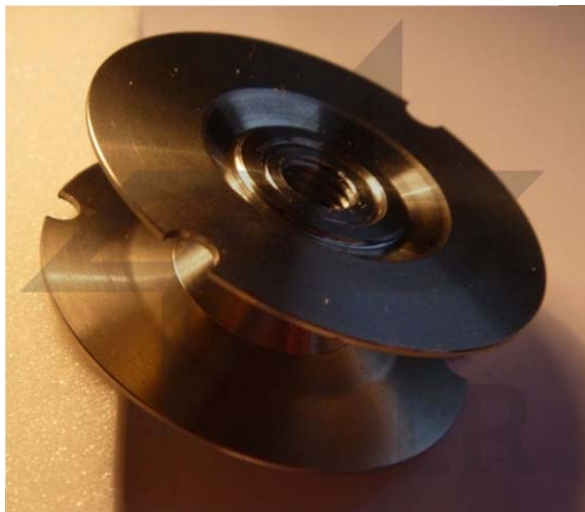


Abb. 138: Zusammengeschaubtes Schraubinsert, 10 mm-Variante.

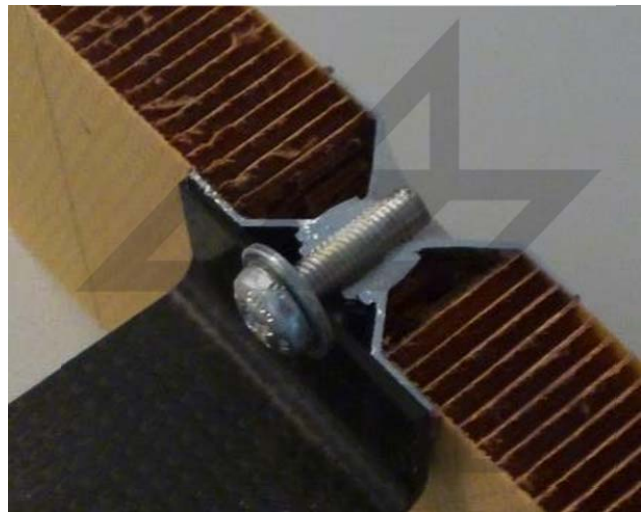


Abb. 139: Schnittdemonstrator des Schraubinsertkonzepts mit lokaler Lastanbindung in einem Sandwichpaneel des Typs 618 HC.

4.4.4.2.3 Festlegung der zu testenden Insertkonzepte

Die Auslegung der Topfinserkonzepte wurde im Halbjahresbericht 2014/1 beschrieben, siehe Dokument „INGA_Halbjahresbericht_HJ1_2014-v10_JWo+APo_FINAL_2014-08-06.pdf“.

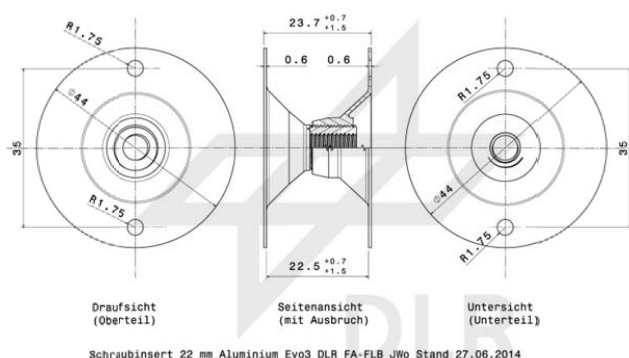


Abb. 140: Dimensionsmaße des Insertprototyps Schraubinsert Aluminium, 22 mm (für Sandwichtyp 618 HC)

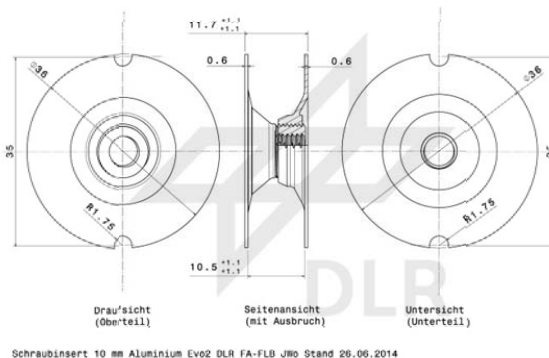


Abb. 141: Dimensionsmaße des Insertprototyps Schraubinsert Aluminium, 10 mm (für Sandwichtyp 616 HC)

4.4.4.3 Festlegung der Testkonfiguration

6. Testarten: 2 (Pull-Out und Sheartests)
7. Konzeptanzahl: 1 (Aluminium)
8. Sandwichtypen: 2 (SELL-Bezeichnung 616 HC, 10 mm Gesamthöhe sowie 618 HC, 22 mm Gesamthöhe)
9. Verstärkungstypen: 4 (unverstärkt, mit Verstärkungsdoubler zugseitig, mit Verstärkungsdoubler druckseitig, mit Verstärkungsdoubler beidseitig)
10. Anzahl der Proben pro Konfiguration: 5

Damit ergibt sich der folgende Probenumfang:

$$2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 5 = 80 \text{ Probekörper} \quad [-] \quad (3)$$

4.4.4.4 Schraubinsert-Sandwichprobekörper

4.4.4.4.1 Dimensionierung

Die Dimensionierung der Probekörper erfolgte mit dem in Abschnitt 2.5.2 beschriebenen Verfahren. Folgend sind einige Beispiele für die Dimensionen der Testkörper dargestellt. Die Abmaße aller Probekörpervarianten für das Schraubinsertkonzept können dem Dokument „2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx“ entnommen werden.

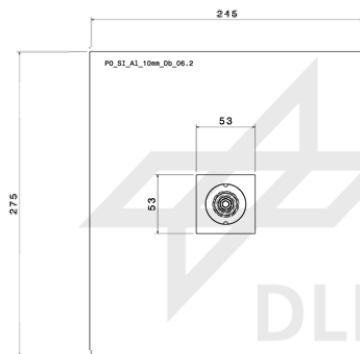


Abb. 142: Dimensionsmaße Pull-Out-Testpanel, 616 HC, 10 mm, beidseitig verstärktes Schraubinsertkonzept.

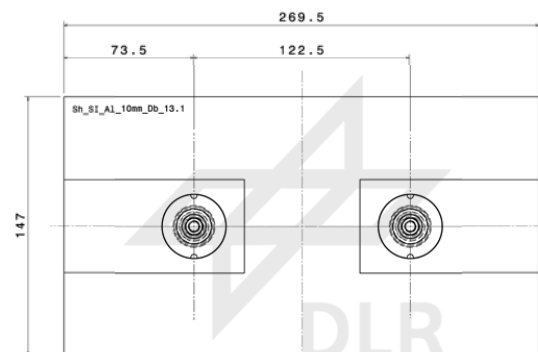


Abb. 143: Dimensionsmaße Shear-Testpanel, 616 HC, 10 mm, beidseitig verstärktes Schraubinsertkonzept.

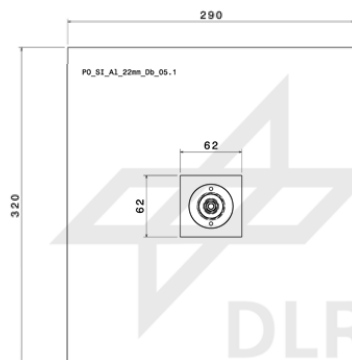


Abb. 144: Dimensionsmaße Pull-Out-Testpanel, 618 HC, 22 mm, beidseitig verstärktes Schraubinsertkonzept.

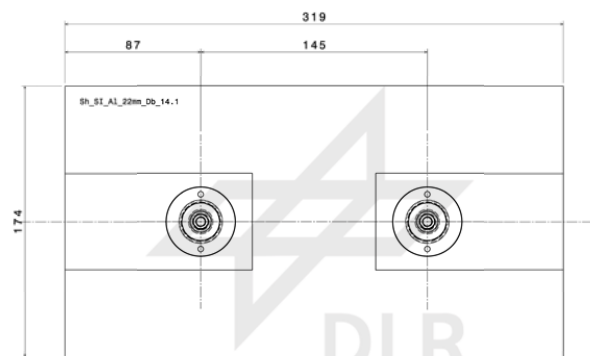


Abb. 145: Dimensionsmaße Shear-Testpanel, 618 HC, 22 mm, beidseitig verstärktes Schraubinsertkonzept.

4.4.4.4.2 Fertigung

Reinigung und Vorprüfung der Sandwichpaneele

Die Sandwichrohpaneele zum Aufbau der Probekörper für die innovativen Inserts wurden dem DLR FA FLB in der Endgeometrie inkl. Bohrlöchern der richtigen Geometrie von der Fa. SELL GmbH zur Verfügung gestellt.

Die Sandwichrohpaneele wurden auf Transportschäden hin überprüft.

Die anschließende Reinigung der Sandwichpaneele erfolgte durch Absaugen des Sägestaubs und Abwischen der zu verklebenden Bereiche mit Aceton getränkten, fusselfreien Papiertüchern. Bei der Fa. SELL GmbH wird statt Aceton das Produkt „Metaclean“ zur Vorbehandlung eingesetzt, nach Absprache mit der Fertigung der Fa. SELL GmbH sind die Reinigungswirkungen jedoch vergleichbar und haben somit auf die Versuchsergebnisse keinen relevanten Einfluss.

Die Absprache über die Oberflächenreinigung erfolgte zu spät, so dass die zu verklebenden Oberflächen der Sandwichpaneele der Topinsert-Sandwichtestkörper vor der Verklebung nicht vorbehandelt wurden. Dadurch bedingte, frühzeitige Versagen der Verklebungen wurden jedoch bei den Versuchen nicht festgestellt.

Verklebung der Schraubinserts

Die Schraubinsertprototypen wurden in die von der Fa. SELL GmbH zur Verfügung gestellten Sandwichprobekörper der Typen 616 HC und 618 HC eingeklebt.

Bei den Schraubinserts erwies sich die Höhenverstellbarkeit durch die zweiteilige Ausführung als großer Vorteil. Durch Zusammendrehen der beiden Einzelteile ließ sich die Schichtstärke des Klebstoffs sowie die Anpresskraft optimal dosieren und einstellen. Per Hand konnte genug Moment aufgebracht werden, um eine optimale Klebstoffschichtstärke zu erreichen. Diese wurde durch ein Knirschen angezeigt, sobald die Spalthöhe die Stärke der im Klebstoff enthaltenen Glaskugeln erreicht hatte, vgl. auch Abschnitt 2.3.2.

Bedingt durch die Form zeigte sich bei beiden Einzelteilen des Schraubinserts eine (zu) große radiale Verschiebbarkeit, die in einer neueren Version durch z. B. Anlegenasen oder einen Absatz eingeschränkt werden muss.



Abb. 146: Fügen des Schraubinserts durch Zusammendrehen der beiden Trichterelemente auf die richtige Höhe



Abb. 147: Große radiale Toleranz durch Verschiebbarkeit des Inserthalbkörpers im Durchgangsloch des Sandwichpaneels

Aushärtung des Klebstoffs

Die Verklebungen der Insert-Sandwichprobekörper wurden, wie im Datenblatt des Klebstoffs als Möglichkeit angegeben, 7 Tage bei Raumtemperatur ausgehärtet.

Ein Aushärten bei erhöhter Temperatur hätte den Vorteil eines höheren Vernetzungsgrads und damit einer leicht höheren Festigkeit des Klebstoffs geboten. Gerade bei großflächigen Verklebungen von Fügepartnern aus Materialien mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten kommt es nach dem Abkühlen jedoch zu Wärmespannungen innerhalb der Klebstoffschicht, die die Festigkeitszunahme teilweise wieder kompensieren.

Beschriftung der Probekörper

Eine anschließende, beidseitige Beschriftung der Insert-Sandwichtestkörper erfolgte nach dem in Abschnitt 2.5.2.2 dargestellten Schema auf dem Randbereich der Sandwichpaneele.

Nachbearbeitung des Klebstoffrands

Zwischen Insertkragen und Deckschicht trat bei der Montage der Schraubinserts in die Sandwichprobekörper aus. Diese „Klebstoffraupe“ ist erwünscht, da sie einen positiven Einfluss auf die Spannungsverteilung im Klebstoffrandbereich hat. Dennoch musste sie nach der Aushärtung manuell teilweise wieder entfernt werden, damit die anzuschraubenden Zuelemente plan aufliegen konnten. Dies war besonders bei den Sheartests notwendig, da hier die Zugaluminiumelemente auf den Insertkragenoberseiten plan aufliegen mussten.

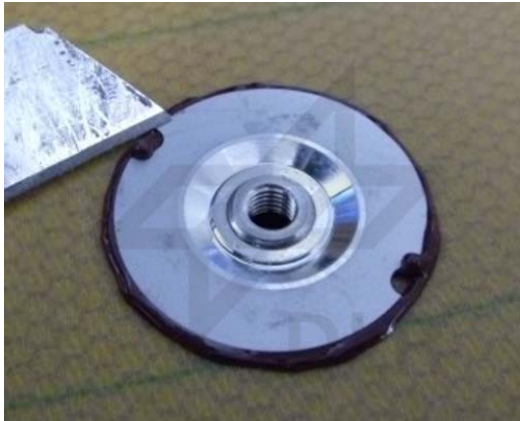


Abb. 148: Über die Insertkragenoberfläche hinausragende Klebstoffwulst

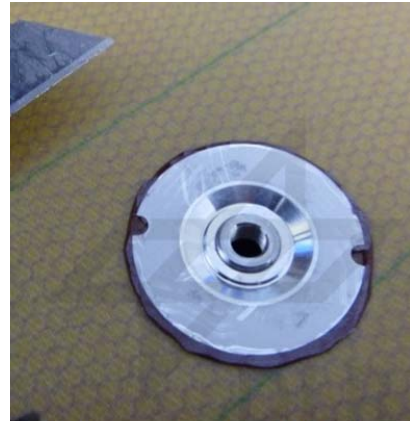


Abb. 149: Entfernen der überstehenden Bestandteile der Klebstoffrands mit einem Cuttermesser

Auswiegen der Insertkonzepte

Die Massen der aktuellen Schraubinsertprototypen wurden durch Auswiegen ermittelt, siehe 4.6.2.

Auswiegen der Gesamtprobekörper

Die fertigen Probekörper wurden ausgewogen, vgl. auch Abschnitt 2.6.4, Seite 183.

4.4.4.5 Tests der Schraubinsertkonzepte

Es wurden sowohl transversale (Pull-Out) als auch flächenparallele (Shear) Belastungstests an den Schraubinsertkonzepten durchgeführt. Die Testgrundlagen und Voraussetzungen, der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die Dokumentation der Tests per Kraft-Weg-Messung, Video und Fotoaufnahmen sowie Mitschriften wird in Abschnitt 2.5.5, ab Seite 179 näher erläutert. Eine Spezifikation der Tests ist im Dokument der Fa. SELL GmbH dokumentiert: „Zerlik_R_Testreport_Innovative_Inserts_SELL_K-1156ALL-1001-22_Rev._new.docx“

4.4.4.5.1 Testergebnisse

Die Testergebnisse (die aufgenommenen Kraft-Weg-Kurven) für die Pull-Out- und die Sheartests können dem entsprechenden Testbericht entnommen werden.

4.4.4.5.2 Festigkeitsberechnung unter transversaler und flächenparalleler Belastung

Die Berechnung der Festigkeiten der Topfininsertkonzepte unter transversaler als auch flächenparalleler Belastung aus den Rohdaten erfolgte nach der in Abschnitt 2.5.6 dargestellten Vorgehensweise, Ergebnisse siehe Tab. 13 sowie Tab. 14.

4.4.4.5.3 Berechnung der Mittelwerte der Maximallasten, statistische Auswertung

Das allgemeine Vorgehen ist in Abschnitt 2.5.6 beschrieben, Ergebnisse für die Topfininsertkonzepte siehe Tab. 13 sowie Tab. 14.

4.4.4.5.4 Massenbestimmung der Einzelkomponenten

Die Gewichtsbestimmung der Einzelteile der Insertlasteinleitungen mit Topfininsertkörpern erfolgte nach dem in Kapitel 2.6 beschriebenen Verfahren.

4.4.4.5.5 Bestimmung der Verbindungsgüten der Topfininsertvarianten

Die Verbindungsgüten wurden unter Nutzung der aus den Testergebnissen berechneten Festigkeiten sowie der Massen berechnet, das allgemeine Vorgehen ist in Abschnitt 2.6, ab Seite 181 beschrieben. Die Ergebnisse für die Topfininsertkonzepte sind in Tab. 13 sowie Tab. 14 dargestellt.

4.4.4.6 Ergebnisübersicht

In den folgenden beiden Tabellen sind die mittleren Festigkeiten, Massen sowie Verbindungsgüten der Topfininsertkonzepte zusammengefasst dargestellt, dies unter transversaler Belastung (Tab. 13) bzw. flächenparalleler Belastung (Tab. 14).

Weiterführende Informationen sind dem Dokument zu entnehmen:

„Zerlik_R_Testreport_Innovative_Inserts_SELL_K-1156ALL-1001-22_Rev._new.docx“

Insertkonzept	Schraubinserts	
Insertmaterial	Alu	Alu
Sandwichtyp	616 HC (10 mm)	618 HC (22 mm)
Ohne Verstärkung		
Mittlere Versagenslast	1452,8 N	2964,6 N
Gesamtgewicht	5,826 g	9,718 g
Verbindungsgüte	249,4 N/g	305,1 N/g
Mit Verstärkung auf der lastzugewandten Deckschicht („Doubler oben“)		
Mittlere Versagenslast	2182,2 N	3768,1 N
Gesamtgewicht	13,146 g	19,855 g
Verbindungsgüte	166 N/g	189,8 N/g
Mit Verstärkung auf der lastabgewandten Deckschicht („Doubler unten“)		
Mittlere Versagenslast	1893,5 N	3659,8 N
Gesamtgewicht	13,282 g	19,595 g
Verbindungsgüte	142,6 N/g	186,8 N/g
Mit Verstärkung auf der beiden Deckschicht („Doubler beidseitig“)		
Mittlere Versagenslast	1888,8 N	4536,9 N
Gesamtgewicht	21,284 g	31,084 g
Verbindungsgüte	88,7 N/g	146 N/g

Tab. 18: Verbindungsgüte der Schraubinserts unter transversaler (Pull-Out) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.⁹

⁹ Mittlere Kräfte: F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FTTr02_Results_clean_innov_Inserts_2014
Mittlere Gewichte: 2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx

Shear-Belastungsfähigkeit: Bei Erstversagen durch gesamtes Gewicht der Insertverbindungskomponenten, ohne Schraubenanteil

Insertkonzept	Schraubinserts	
Insertmaterial	Alu	Alu
Sandwichtyp	616 HC (10 mm)	618 HC (22 mm)
Ohne Verstärkung		
Mittlere Versagenslast	10960,8 N	9432,1 N
Gesamtgewicht	5,930 g	9,694 g
Verbindungsgüte	1848,4 N/g	973 N/g
Mit Verstärkung auf der lastzugewandten Deckschicht („Doubler oben“)		
Mittlere Versagenslast	9705,1 N	10275,3 N
Gesamtgewicht	21,249 g	31,594 g
Verbindungsgüte	456,7 N/g	325,2 N/g
Mit Verstärkung auf der lastabgewandten Deckschicht („Doubler unten“)		
Mittlere Versagenslast	9618,3 N	10578,0 N
Gesamtgewicht	21,043 g	32,103 g
Verbindungsgüte	457 N/g	329,5 N/g
Mit Verstärkung auf der beiden Deckschicht („Doubler beidseitig“)		
Mittlere Versagenslast	9817,7 N	11278,5 N
Gesamtgewicht	37,132 g	52,627 g
Verbindungsgüte	364,4 N/g	214,3 N/g

Tab. 19: Verbindungsgüte der Schraubinserts unter flächenparalleler (Shear) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.

4.4.4.7 Leistungsvergleich zu konventionellen Inserts

Die Schraubinsertkonzepte (ohne Doublerversärkung) zeigten unter transversaler (Pull-Out) Belastung Verbindungsgüten zwischen 88,7 – 305,1 N/kg und liegen damit im unteren Mittelfeld der Standardinserts, Abb. 85.

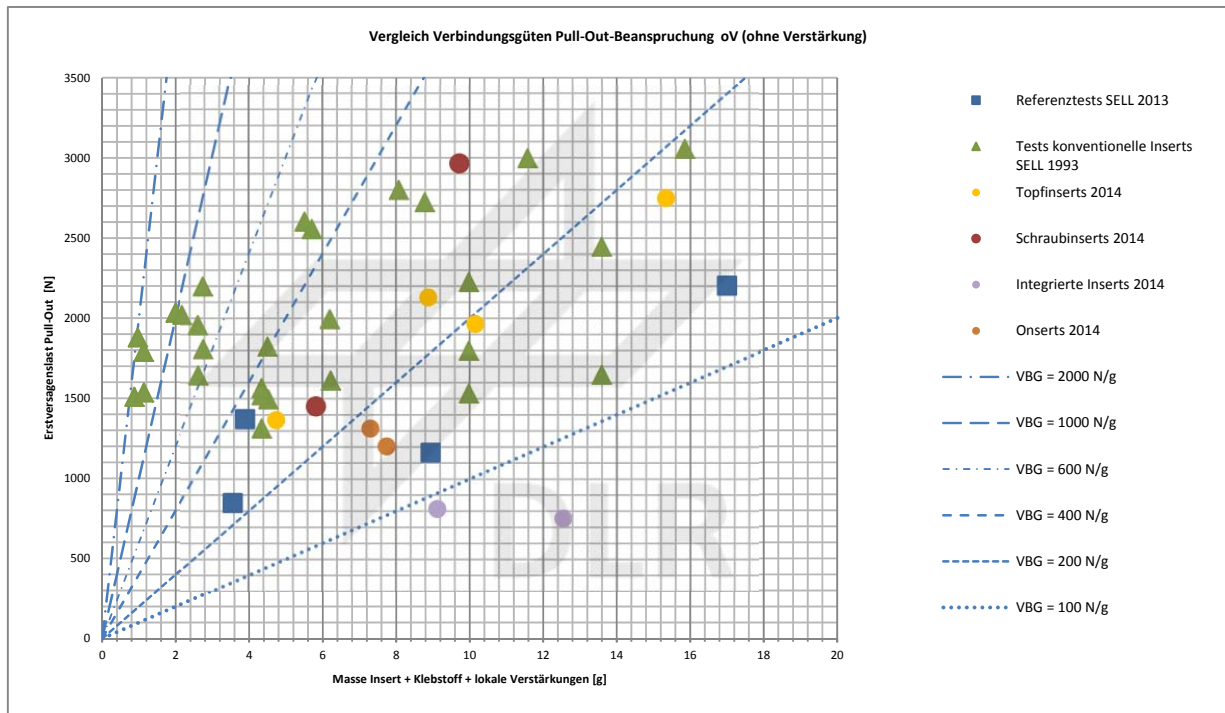


Abb. 150: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter transversaler Belastung (Pull-Out).¹⁰

¹⁰ Quelle: 2015-05-04_InGa_Pull_Out-Werte_P_m_konv+inno_Inserts_v01_JWo.xlsx

Die Schraubinsertkonzepte (ohne Doublerversärkung) zeigten unter flächenparalleler (Shear) Belastung Verbindungsgüten zwischen 214,3 – 10960,8 N/kg und liegen damit teilweise über dem Niveau der besten Standardinserts, Abb. 86.

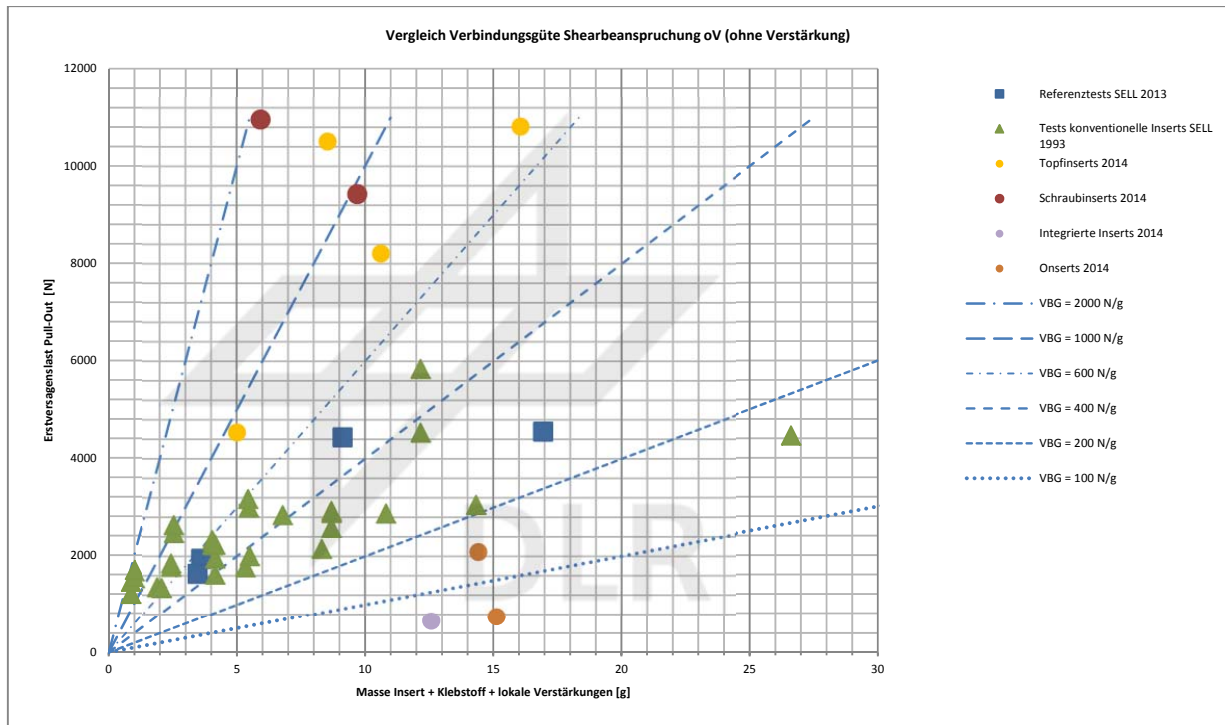


Abb. 151: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter flächenparalleler Belastung (Shear).¹¹

4.4.4.8 Anfertigung von Schnittdemonstratoren sowie Installation in der Demonstratorgalley

Es wurden Schnittdemonstratoren mit Topfininsertverbindungen angefertigt sowie Topfininserts in der Demonstratorgalley des Projekts InGa installiert, siehe Abschnitt 2.8 ab Seite 185.

¹¹ Quelle: 2015-05-05_InGa_Shear-Werte_P_m_konv+inno_Inserts_v02_JWo.xlsx

4.4.4.9 Lessons learned: Weiterentwicklungsempfehlungen

4.4.4.9.1 Integration von Positionierkragen

Die getesteten Schraubinsertkonzepte zeigten einen großen Spielraum radial bzw. sind in großem Maß seitlich in den Bohrungen verschiebbar. Dies macht eine präzise Positionierung der Inserts unmöglich. Um eine eindeutige Positionierung zu erreichen, sollten neuere Konzepte der Schraubeninserts mit zusätzlichen Absätzen versehen werden, die sich in den Lochrändern der Bohrungen abstützen und so eine genaue Positionierung der Inserts in der Bohrung gewährleisten, siehe Abb. 87.

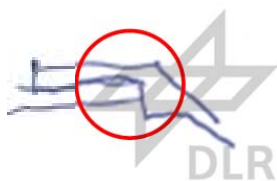


Abb. 152: Einführung eines zusätzlichen Absatzes in den Trichterteilen des Schraubinserts zur präzisen Fixierung des Inserts in der Bohrung.

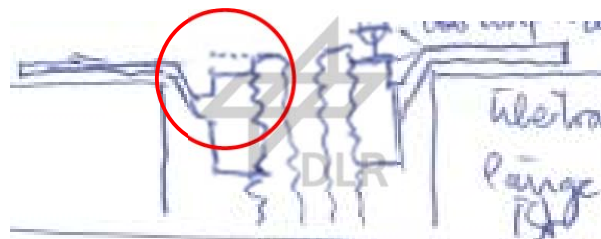
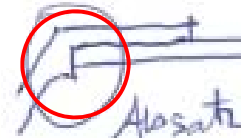


Abb. 153: Probleme durch Höhenversatz der Stirnfläche des Zentralzylinders zur Kragenoberfläche.

4.4.4.9.2 Durchgehende Auflagefläche beim Schraubinsertoberteil

Weiterhin weisen die getesteten Schraubinsertkonzepte einen Höhenversatz zwischen der Kragenoberfläche und der Stirnfläche des Zentralzylinders auf, vgl. Abb. 151. Bei zukünftigen Weiterentwicklungen sollte dieser Höhenunterschied eliminiert werden, da flächige Anschraubteile dann durch die Klemmkraft der Schraube nicht nur auf der Kragenfläche, sondern auch direkt auf dem Zentralzylinder fixiert werden.

4.4.4.9.3 Umgestaltung der Innenzylinder, Anbindung an den Sandwichkern

Da die im Projekt InGa entwickelten Insertkonzepte nur einen Teil eines umfassenderen Prüfprogramms darstellen, bei der die Einflussgrößen der Einzellastpfade (Anbindungsstellen) von Inserts in das Sandwichpaneel untersucht werden, weisen die getesteten Schraubinsertkonzepte keine Verbindung zu den Kernwaben auf um diese Einflussgröße zu eliminieren. Zukünftige Weiterentwicklungen des Schraubinserts sollten diesen Lastpfad jedoch nutzen. Statt der doppelkegligen Ausführung könnten zukünftige Weiterentwicklungsstufen des Schraubinserts zylindrische Mittelteile mit einer Verklebung mit den Kernwaben aufweisen. Alternativ könnte der Hohlraum zwischen Doppelkegel und Kern mit einem expandierenden Schaum ausgefüllt werden.

4.4.4.9.4 Anpassung der Deckschichtkragen für begrenzten Klebstoffaustritt

Eine (evtl. geometrische) Änderung des Insertkragens, die ein Austreten des Klebstoffs über die Kragenoberfläche hinaus verhindert, wird für zukünftige Weiterentwicklungsstufen des Schraubinsertkonzepts empfohlen, siehe Abb. 83 und Abb. 84.

4.4.5 Integrierte Inserts

4.4.5.1 Problemstellung in der konventionellen Galley

Inserts, mit denen die Trolley-T-Devider und -anschlänge an der Galley befestigt sind (z. B. der Inserttyp NAS 1836-08-11) zeigen geringe Verbindungsgüten. Dies liegt einerseits am hohen Gewicht des zur Montage notwendigen Klebstoffs, um die angebohrten Wabenzellen des Kerns im Bohrungsbereich ausfüllen zu können. Andererseits sind die eingesetzten Inserts vom Typ „verlorenes Insert“ (vgl. Abschnitt 2.1.3, ab Seite 61) und zeigen daher vergleichsweise geringe Festigkeiten gegenüber Zug- und Momentenbelastungen, siehe auch Abb. 94.

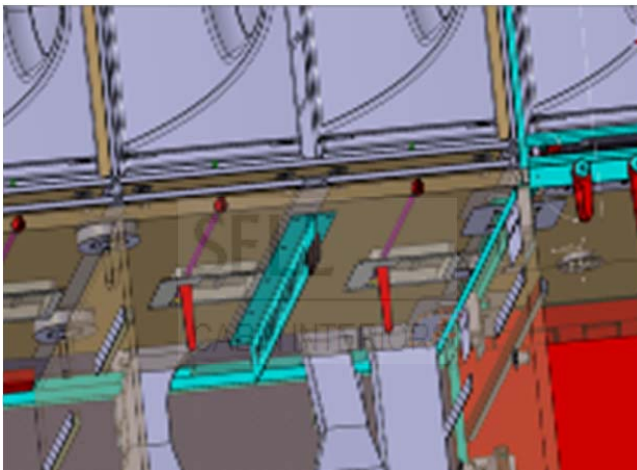


Abb. 154: T-Devider zur räumlichen Trennung und Fixierung der Container in der Galley (42).



Abb. 155: Containeranschlag an der Rückseite einer Galley, befestigt mit Hilfe von drei Inserts (42).

Im Gegensatz zu den anderen Insertkonzepten liegt beim „integrierten“ Insertkonzept der Schwerpunkt auf der Optimierung des Fertigungsverganges. Es soll eine Reduzierung der Arbeitsschritte zur Herstellung der Sandwichstruktur der Galleys erreicht werden. Ansatz ist, die Verbindungselemente (Inserts) bereits bei der Herstellung der Sandwichplatten selber, noch vor der Aufbringung der Deckschichten, einzubringen. Es kann so der gesamte nachträgliche Installationsaufwand, der zur Montage der konventionellen Inserts betrieben werden muss, gespart werden.

Auch ist das integrierte Insert sofort belastbar bzw. muss nicht die Aushärtezeit des Klebstoffs abgewartet werden, siehe Abb. 91.



1. Ausstanzen von Löchern aus dem Kernmaterial zur Aufnahme der integrierten Inserts.



2. Einlegen des Insertunterteils.



3. Einbringen der Klebstoffmasse zur Verbindung der Insertteile und als Vergussmasse zum Befestigen im Wabenkern.



4. Aufstecken des Insertoberteils, Auflegen der oberen Deckschicht.



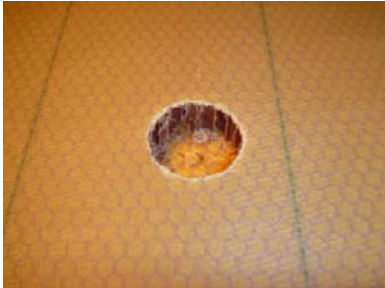
5. Nach dem Verpressen und Aushärten der Deckschichten: Kernintegrierte Inserts.



6. Zugang zu den zentralen Anschraubgewinden der Inserts durch Anbohren der Deckschicht.

Abb. 156: Fertigungskonzept der integrierten Inserts: Die Inserts werden noch vor Endfertigung des Sandwichs in den Sandwichwabenkern eingebracht.

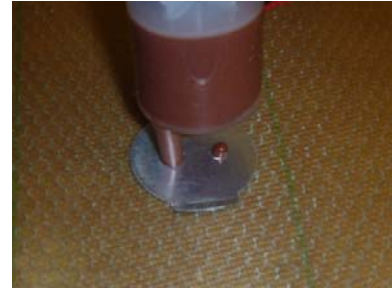
Damit wird die Insertintegration hin zur Paneelfertigung verlagert, so dass die Inserts nicht mehr nachträglich über zeitaufwendiges, fehlerintensives händisches Einkleben in das Sandwichpaneel integriert werden müssen, vgl. Abb. 92.



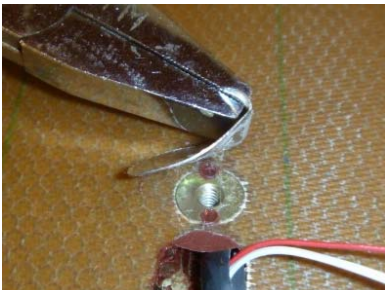
1. Bohrung des Lochs zur Aufnahme des Insertkörpers.



2. Einstecken des Inserts in die Bohrung.



3. Füllung des Hohlraums mit Vergussmasse (Potting).



4. Entfernung des Montageflansches nach dem Aushärten des Klebstoffs.



5. Entfernung der überstehenden Klebstoffreste.

Abb. 157: Konventionelle Montage von Insertlasteinleitungen in Sandwichpaneelen.

Weiterhin wird eine Automatisierbarkeit des optimierten Prozesses angestrebt. Für Serienfertigung von Galleys des gleichen Typs könnten so Standardsandwichenelemente mit bereits integrierten Inserts einfach und schnell in großen Stückzahlen produziert werden.

4.4.5.2 Konzeptentwicklung

4.4.5.2.1 Konzeptansätze

Als ein erster Ansatz für kernintegriertes Insert wurden über die Fa. KVT Inserts mit einem Kragen und einer Aluminiummembran über dem Gewinde bezogenen, siehe Abb. 93.



Abb. 158: KVT-Inserts als Ansatz zur Darstellung der „eingebackenen Inserts.“

Dieser Inserttyp wurde jedoch als nicht geeignet bewertet, da er nicht kraftflussgerecht im Sandwich integriert werden kann. Darüber hinaus sind die KVT-Inserts nicht in der richtigen Höhe lieferbar, was ein Anbohren zum Erreichen des Innengewindes sehr aufwendig und fehlerintensiv macht.

Als zweiter Ansatz wurde ein umschäumtes und mit UD CFK-Tape umwickeltes Gewindeinsert gewählt, als Vorbild diente das in (43) vorgestellte Insertkonzept, siehe Abb. 95. Dieses Insertkonzept wird ebenfalls bereits bei der Herstellung des Sandwichelements vor dem Auflegen der oberen Deckschichtprepregs in Aussparungen im Honigwabenkern eingesetzt.

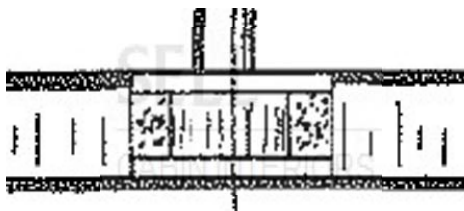


Abb. 159: Konventionelles Insert NAS 1835-08-11 im Sandwichverbund (35).

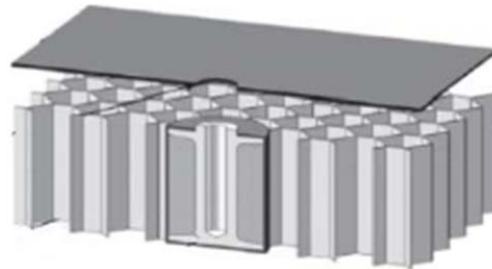


Abb. 160: Innovatives Insert mit Schaumvolumen und CFK-Faserumwicklung, integriert im Sandwichkern (43).

Dazu sollte der Inserttyp „KVT, bigHead Befestiger TwinDisk“, Variante mit Gewindebuchse mit einem selbstschäumenden Schaum (z. B. Hartschaum PB 250 mit Härter DM 03, Hersteller Fa. Sicom in Epoxy systems) nach dem Schema in umschäumt und in den Wabenkern eingeklebt werden, siehe Abb. 96 und Abb. 97.



Abb. 161: KVT-Insert des Typs „bigHead Befestiger TwinDisk“

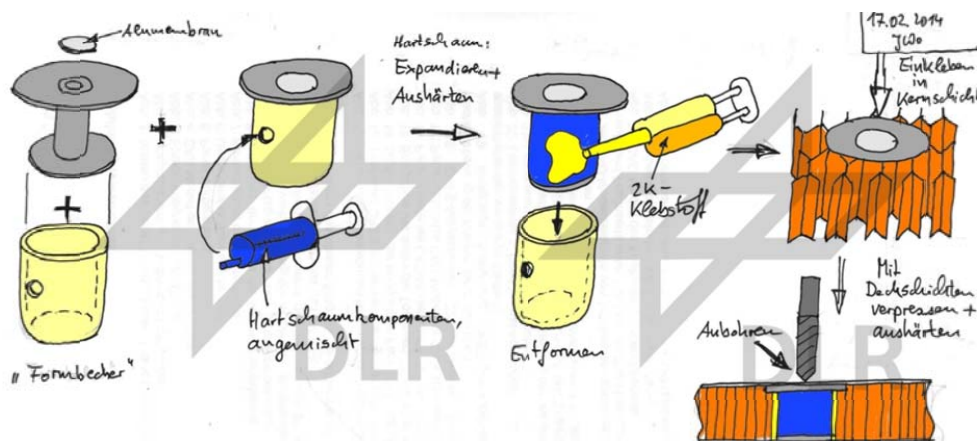


Abb. 162: Fertigungs- und Installationsschema des zweiten Konzeptansatzes.

Aus dem vergrößerten Insertvolumen durch den Schaumkern resultiert ein höherer Widerstand gegen Biegebelastungen, der zu einer hohen VBG bzw. einem geringen Gewicht der Verbindung führt.

Bei diesem Ansatz ist jedoch die Heiaushärtung der Sandwichpaneele mit den integrierten Inserts problematisch. Das Panel wird in der Presse bei ca. 135°C über eine Stunde in der Panelpresse ausgehärtet. Weiterhin wurde der Konzeptansatz von der Fa. SELL GmbH als zu aufwendig und teuer bewertet.

Nach diesen negativen Bewertungen der Erstansätze für den Einsatz als kernintegrierte Inserts wurden im Halbjahr 2014/1 gemeinsam mit der Fa. SELL GmbH das Schraub-, sowie das Steckkonzept entwickelt und einer Fertigungsuntersuchung sowie mechanischen Tests unterzogen. Die Fertigungsuntersuchung erfolgte gemeinsam mit der Schütz GmbH & Co. KGaA, welche unter anderem die Sandwichtypen 618 HC sowie 616 HC für die Fa. SELL GmbH fertigt. Bei den Fertigungsuntersuchungen wurden mehrere Mustersandwichpaneele mit integrierten Inserts gefertigt und daraus gefertigte Probekörper getestet. Aus diesen Ergebnissen wurde das aktuelle „Klick-Insertkonzept“ weiterentwickelt, vgl. Abschnitt 2.4.5.2.4, Seite 125.

4.4.5.2.2 Schraubkonzept für den Sandwichtyp 618 HC

Durch verschrauben von zwei Insertteilen im Wabenkern wird ein integriertes Insert generiert, dass auf beiden Seiten einen großen Flansch aufweist, der sich auf den Innenseiten der Sandwichdeckschichten abstützen kann. Die korrekte Höhe kann über die Zentralverschraubung fein eingestellt werden, die restlichen, freien Gewingegänge können zur Anbringung der Lasten genutzt werden, siehe Abb. 98 bis Abb. 100.



Abb. 163: Schraubkonzept der Integrierten Inserts: Gewindebolzen- und Gewindebuchsen-Inserthalbkörper.

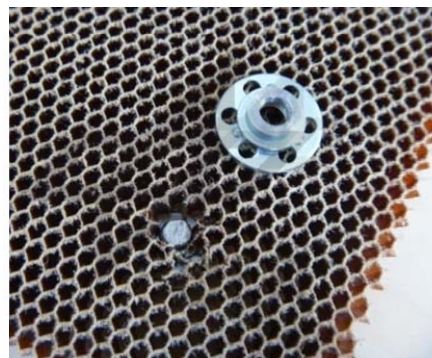


Abb. 164: In eine Kernausstanzung des Honigwabenkerns eingesetztes Gewindebolzenelement.



Abb. 165: Durch Zusammenschrauben der im Wabenkern fixierten Inserthalbkörper.



Abb. 166: Fertige Verbindungsstelle nach dem Aufbringen und Aushärten der Deckschichten.

Für die Versuche im Projekt InGa werden die bigHead-Inserthalbkörper *Gewindebuchse F2/S20 - M6 x 10* und *Gewindebolzen M1/B20 - M6 x 20* der Fa. bigHead Bonding Fasteners Ltd genutzt. Die Inserthalbkörper der Fa. bigHead Bonding Fasteners Ltd sind unter mechanischen Gesichtspunkten nicht optimal gestaltet, sie weisen zu hohe Wandstärken auf, so dass der Steifigkeitssprung zwischen Insert und Wabenkern hoch ist. Da keine anderen passenden Elemente gefunden werden konnten, werden sie dennoch verwendet.

Vorteile des Schraubkonzepts:

- Die Gesamthöhe des Insert lässt sich durch Verdrehen der Inserthalbkörper zueinander fein und stufenlos einstellen. Damit ist ein Ausgleich von Kernhöhtoleranzen sehr einfach möglich.
- Durch das Verschrauben klemmen die Inserthalbkörper die unter den Kragen zerdrückten Waben ein und halten sich sofort in einer zur Oberfläche des Wabenhalbzeugs planen Position, es muss nicht auf eine Aushärtung von Klebstoff o. ä. gewartet werden (Wie beim Steckkonzept, vgl. Abschnitt 2.4.5.2.3 ab Seite 122).
- Bei den Fertigungsversuchen zeigte sich, dass die offenen Gewindegänge entgegen erster Vermutungen nicht durch eintretendes Harz verunreinigt wurden, so dass keine Schutzmaßnahmen (Membran, Wachspfropf) notwendig sind.

Nachteile des Schraubkonzepts:

- Beim Sandwichtyp 616 HC resultiert eine zu geringe Einschraubtiefe für die Lastanbindung, vgl. Abb. 101.
- Die Pressen der Fa. Schütz GmbH & Co. KGaA sind kraftgesteuert, d. h. sie stoppen erst, wenn eine gewisse Widerstandskraft erreicht ist, um die Anbindungsgüte zwischen den Prepreg-Deckschichten und dem Wabenkern zu optimieren. Dies hat jedoch den Nachteil einer gewissen Unsicherheit bei der Gesamthöhe des fertigen Sandwichs. Die geschraubten Inserts können jedoch selbst kleine Unterschiede in der Höhe nicht ausgleichen, so dass es bei zu hohen Inserts zu Anbindungsproblemen der Deckschichten an den Wabenkern, bei zu kleinen Inserts zu Anbindungsproblemen der Insertkragen an die Deckschichten kommen kann. Die Inserts sollten auf jeden Fall nur maximal so hoch geschraubt werden wie die minimale Kernstärke zuzüglich des Einfederwegs der Presse ist. Fa. SELL GmbH rechnet mit einer Herstellungsungenauigkeit von + 0,1 mm und –0,1 mm für die Kernhöhe. Damit ergeben sich Minimalwerte der Kernstärke der Sandwichtypen 616 und 618 (abzüglich der Deckschichten) von 9,3 mm für den Sandwichtyp 616 HC sowie 21,3 mm für den Sandwichtyp 618 HC.

4.4.5.2.3 Steckkonzept für den Sandwichtyp 616 HC

Bei Verwendung des Schraubkonzepts (Abschnitt 2.4.5.2.2) im Sandwichtyp 616 HC ergibt sich eine zu geringe Einschraubgewindetiefe sowohl der Inserthalbkörper untereinander als auch für die Befestigung der lokalen Last, vgl. Abb. 101. Es besteht dadurch die Gefahr, dass die kurze Gewindeverbindung überlastet wird und es noch vor einer Schädigung der Insert-Sandwichverbindung zu einem Versagen der Verschraubung der Inserthalbkörper untereinander kommt. Dies hätte ein ungewolltes Versagen der Insertverbindung zur Folge, vgl. auch Abschnitt 2.4.1.3.1.4, Seite 87.

Die Höhenverstellbarkeit hat sich bereits beim Schraubkonzept bewährt und soll daher auch für das Insertkonzept für den Sandwichtyp 616 HC beibehalten werden.

Durch ein Ausbohren der BigHead-Gewindebuchse *F2/S20 – M10 x 14* auf einen Innendurchmesser von 8 mm kann diese gleitend auf die Gewindebuchse *F2/S20 - M6 x 10*

aufgesteckt werden, siehe Abb. 102. Durch Klebstoffapplikation auf den Zentralzylinder der Einsteckbuchse werden die Buchsen stoffschlüssig miteinander verbunden.



Abb. 167: Inserthalbkörper des Steckkonzepts. Durch Ausbohren des Buchsenelements M 10 kann das Gewindebuchsenelement der Größe M 6 eingesteckt werden.



Abb. 168: In die Kernwabe eingebrachtes Gewindebuchsenelement.



Abb. 169: Klebstoffapplikation auf den Zylinder des Gewindebuchsenelements.



Abb. 170: Die Kragen des in das Wabenhalbzeug eingesetzten Inserts stehen über die Wabenoberfläche hinaus.

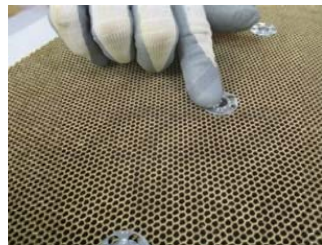


Abb. 171: Eindrücken des Buchsenelements M 6 durch Zusammendrücken („Crushen“) der Waben in den Bereichen unter den Insertkragen.

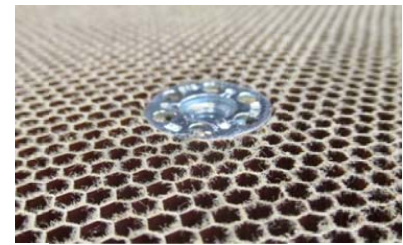


Abb. 172: Ziel: Nach dem Eindrücken ist das Insert plan in den Wabenkörper integriert.

Vorteile des Steckkonzepts

- Die Gesamthöhe des Inserts lässt sich durch Verschieben der Inserthalbkörper ineinander fein und stufenlos einstellen. Damit ist ein Ausgleich von Kernhöhtoleranzen sehr einfach möglich.
- Es sind nur einfache Bearbeitungsschritte der Gewindebuchse F2/S23 – M8 x 10 (Ablängen und Ausbohren) sowie der Gewindebuchse F2/S23 – M6 x 10 (Ablängen) notwendig.
- Die Gefahr des Zufließens des M 6-Gewindes für die Lastanbindung mit Harz der Deckschichtprepregs beim Aushärtungsvorgang ist gering, da die untere Gewindebuchse die obere Deckschicht nicht berührt.
- Das Anschraubgewinde hat eine Mindestlänge von 5,2 mm, womit sichergestellt ist, dass ein Gewindeversagen nicht mehr als Versagensfall auftritt.
- Durch den Klebstoff ist keine aufwendige Passung der Inserthalbkörper zueinander notwendig, er wirkt spaltausgleichend.
- Wird ein heißaushärtender Klebstoff benutzt, kann der Klebstoff in der Presse gleichzeitig mit den Deckschichtprepregs ausgehärtet werden. Die Inserthalbkörper können ggf. zuvor beim Pressprozess zum Toleranzausgleich noch einen kleinen Weg zusammengeschoben werden.

Nachteile des Steckkonzepts

- Die Inserthalbkörper der Fa. bigHead Bonding Fasteners Ltd sind unter mechanischen Gesichtspunkten nicht optimal gestaltet, sie weisen zu hohe Wandstärken auf, so dass der Steifigkeitssprung zwischen Insert und Wabenkern hoch ist.
- Die Inserthalbkörper werden durch die Rückstellkräfte der unter den Kragen gecrushten Waben auseinandergedrückt. Dieses Problem wird im folgenden Absatz näher erläutert.

Rückstellproblematik der gecrushten Kernwaben

Die Inserthalbkörper müssen, um sowohl ineinander gleiten zu können als auch beidseitig eben mit dem Wabenkern abzuschließen in den Wabenkern eingedrückt werden. Dabei werden die Kernwaben unter den Insertkragen der Inserthalbkörper lokal zusammengedrückt bzw. „gecrusht“. Als sehr problematisch erwies sich die Eigenschaft der gecrushten Waben, sich wieder in die Ausgangsform zurückzustellen. Dieses Rückstellungs- bzw. Auffedern führte zum Hochdrücken und Auseinanderziehen der Inserthalbkörper untereinander, siehe Abb. 108.



Abb. 173: Problematik des Zurückrutschens durch die Feder- bzw. Rückstellkraft der zusammengedrückten Waben unter den Insertkragen nach der Entlastung



Abb. 174: Kontrolle des konzentrischen Sitzes aller Inserthalbkörper zueinander durch Andrücken der Deckschicht im Insertbereich

Damit ist ein Verrutschen der Inserthalbkörper gegeneinander möglich, was beim bei Zufahren der Presse zu einem Zerquetschen der Inserthalbkörper untereinander, bei einer ungesteuerten Presse aber auch zu deren Schädigung führen kann. Eine kraftgesteuerte Presse wird bei zu viel Widerstand den Zufahrtvorgang stoppen und nicht mehr den für das Sandwichpaneel korrekten Abstand erreichen.

Hier wurden verschiedene Überlegungen angestellt, z. B. die Inserthalbkörper untereinander mit einem Sekundenkleber zu fixieren. Es wurde jedoch kein Sekundenkleber gefunden, der eine für den anschließenden Aushärtvorgang hinreichende Temperaturstabilität aufweist.

Letztendlich wurde ein temperaturstabiler, in 60 min aushärtender Klebstoff gewählt, siehe Abschnitt „Klebstoffauswahl“. Durch mehrmaliges, manuelles Nachdrücken auf die Inserthalbkörper (und einem hörbaren „Knirschen“, dass ein Zerknicken der Wabe unter dem Kragenbereich anzeigte) konnte eine genügend tiefer Sitz der Inserthalbkörper erreicht werden, siehe Abb. 109.

Dieses manuelle, mehrfache Nachdrücken ist für eine Großserienfertigung jedoch nicht geeignet. Eine Verlängerung der Inserts (und damit des Steckbereichs bzw. der Stecklänge) ist nur für den 618 HC Sandwichtyp möglich, da hier durch die höhere Kernhöhe mehr „Spielraum“ vorhanden ist.

Nach Auflegen der Tülle und der Deckschichtprepregs wurden die Inserts nochmals mit einem Flacheisen in die Waben gedrückt und damit kontrolliert, dass die Inserthalbkörper konzentrisch ineinander sitzen und damit ineinander gleiten können. Durch das aufliegende

Deckschichtprepreg wurde ein minimaler Druck auf das Insert aufgebracht, so dass die Inserthalbkörper in Position gehalten wurden. Danach wurde eine Aluminiumplatte auf das zu verpressende Sandwichpaneel gelegt, wodurch die Inserthalbkörper endgültig gegen ein Auseinanderdrücken durch den Wabenkern fixiert waren.

Lösungsansatz

Eine Lösung für den Sandwichtyp 616 HC wird in der Formänderung der Insertprototypen gesehen. Wenn der zweite, kleinere Kragen wegfiel, wäre auch eine Verlängerung der Steckbuchsen denkbar, ohne dass diese beim Zusammenstecken „auf Block“ gehen würden. Dies erfordert jedoch andere Inserthalbkörper, da die BigHead-Befestiger von KVT alle fertigungsbedingt über den zweiten, kleineren Kragen verfügen (müssen).

Klebstoffauswahl

Zur Auswahl standen zwei Klebstoffe, die als primäre Anforderung haben, dass sie die Temperatur von 135 °C über 1 h, die beim Aushärtungs-bzw. Verpressungsvorgang der Deckschichtprepregs herrscht, ohne Schädigung ertragen können.

Die zur Auswahl stehenden Klebstoffe waren ein 2K-Epoxidklebstoff 3M Scotch-Weld DP 760 (raumtemperaturaushärtend, Topfzeit ca. 60 min, Temperaturstabilität 120 °C) sowie der 1K-Klebstoff 3M Scotch-Weld 2214 (heißaushärtend, Temperaturstabilität 170 °C). Der Vorteil des heißaushärtenden Klebstoffs ist die Aushärtung direkt beim Verpressungsprozess gewesen.

Es wurde jedoch der 2K-Klebstoff verwendet, da dieser bereits einige Minuten nach der Applikation eine deutliche Viskositätszunahme aufwies. Diese stellte eine zusätzliche Fixierung der Inserthalbkörper untereinander gegen das im vorherigen Absatz beschriebene „Rückstellen“ des Wabenkerns dar. Der Nachteil ist, dass der 2K-Klebstoff die hohen Temperaturen im Pressenprozess bereits vor dem kompletten Durchhärten (7 Tage bei Raumtemperatur) ertragen muss, was evtl. zu Schädigungen bzw. zu Festigkeitsverlusten führt. Da der Klebstoff jedoch die Gesamtverbindung nicht festigkeitsrelevant ist wird dieser Umstand akzeptiert.

4.4.5.2.4 2015er Klickkonzept

Das sog. „Klickkonzept“ ist aus den Erfahrungen mit dem Steck- und Schraubkonzept in Gemeinschaftsarbeit mit der Fa. SELL GmbH abgeleitet worden.

Um eine einfache, schnelle Fixierung der Inserthalbkörper untereinander zu erreichen und damit das Auseinanderdrücken durch die Wabenrückstellungskräfte zu unterbinden, rasten die beiden Inserthalbkörper beim Einschiebevorgang durch einen Ratschenmechanismus untereinander ein. Bei diesem gleiten Nasen bzw. Zähnnchen in Widerlagernuten auf dem inneren Zylinder des unteren Inserthalbkörpers, vgl. Abb. 110.

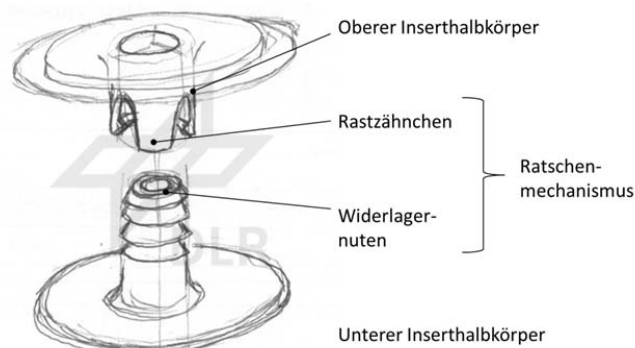


Abb. 175: Konzeptskizze des Klickinserts.

Die folgenden Konzeptskizzen stellen Weiterentwicklungen dieser ersten Idee dar. Hier wird der Ratschenmechanismus nur zu Erstfixierung der Inserthalbkörper genutzt. Die mechanische Verbindung der Inserthalbkörper untereinander erfolgt anschließend durch ein Ineinander gleiten des Innenzylinders des unteren Inserthalbkörpers in die Buchse des Oberen. Durch die Presspassung kann die Höhe stufenlos durch die Presse eingestellt werden, vgl. Abb. 111.

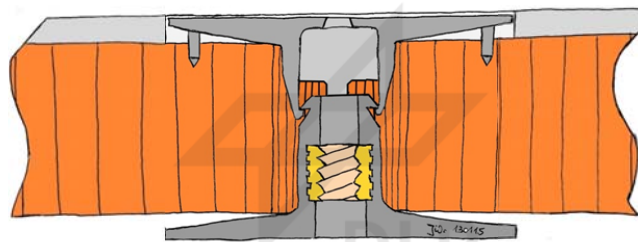


Abb. 176: Zweite Konzeptstufe des Klickkonzepts. Der Rastmechanismus ist auf eine einstufige Rastung reduziert. Die mechanische Verbindung erfolgt anschließend durch Presspassung der Inserthalbkörper ineinander.

Werden weiterhin die Rastzähne in die Pressbuchse integriert, kann die Bauhöhe des Inserts stark reduziert werden, so dass das Klickkonzept u. U. auch für eine Verwendung im niedrigeren Sandwichtyp 616 HC geeignet ist, vgl. Abb. 112.

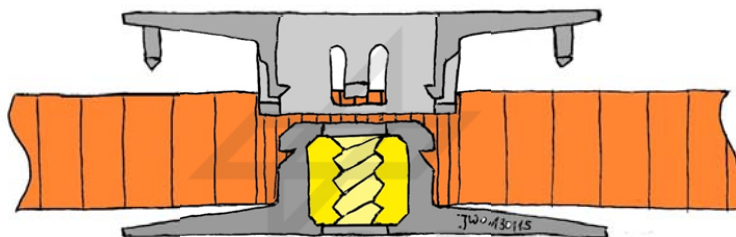
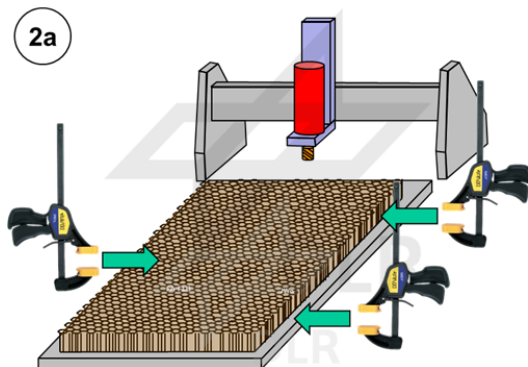


Abb. 177: Dritte Konzeptstufe des Klickkonzepts mit in die Pressbuchse integrierten Rastzähnen

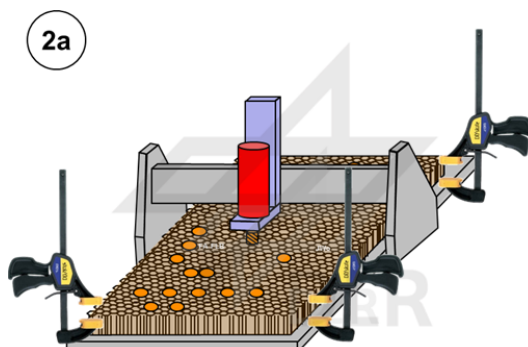
4.4.5.2.5 Fertigungsschrittanalyse für das Klickkonzept

Vom DLR FA FLB wurde eine visuelle Fertigungsschrittanalyse für das Klickkonzept für den Fertigungsabschnitt „Insertintegration in den Wabenkern“ zur Verfügung gestellt und mit Hilfe der Fa. SELL GmbH sowie der Fa. Schütz GmbH & Co. KGaA optimiert. Die Fertigungsschrittanalyse wird der Fa. Schütz GmbH & Co. KGaA dazu dienen, eine Kostenrechnung für die Fertigung von Sandwichhalbzeuge mit integrierten Inserts aufzustellen, die anschließend durch die Fa. SELL GmbH mit den Kosten für die aktuelle, nachträgliche Installation konservativer Inserts verglichen werden kann. Der aktuelle Stand ist in den folgenden Abb. 113 bis Abb. 116 dargestellt.



Nummer des Arbeits-schritts	Beschreibung	Anzahl	Ausführende Firma
2a.1	Programmierung Portalfräse	1 x NCR	Fa.Schütz
2a.2	Bereitstellung Wabenkern	1 x RC	Fa.Schütz
2a.3	Wabenkern positionieren	1 x RC	Fa.Schütz
2a.4	Wabenkern einspannen	1 x RC	Fa.Schütz

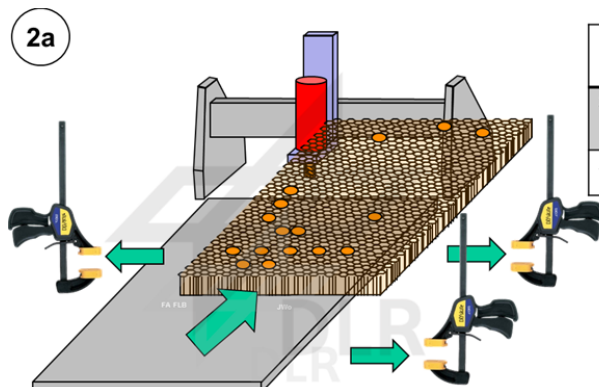
Abb. 178: Bearbeitung des Wabenkerns 1: Einspannung.



Nummer des Arbeits-schritts	Beschreibung	Anzahl	Ausführende Firma
2a.5	Werkzeugvorbereitung	1 x RC	Fa.Schütz
2a.6	Bohren / Fräsen des Lochbilds	X x RC*	Fa.Schütz
2a.7	Reinigen	1 x RC	Fa.Schütz

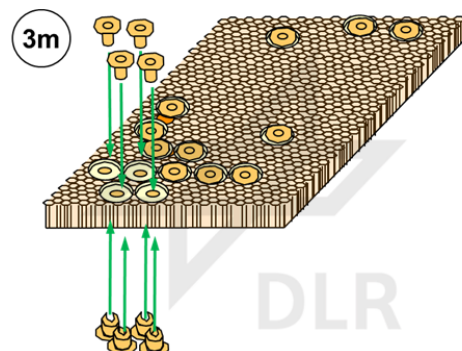
*) = je nach Anzahl der Inserts

Abb. 179: Bearbeitung des Wabenkerns 2: Einbringen des Lochbilds für die Inserts.



Nummer des Arbeits-schritts	Beschreibung	Anzahl	Ausführende Firma
2a.8	Entspannen des Wabenkerns	1 x RC	Fa.Schütz
2a.9	Entnahme des Wabenkerns	1 x RC	Fa.Schütz

Abb. 180: Bearbeitung des Wabenkerns 3: Reinigung und Entspannung.



Nummer des Arbeits-schritts	Beschreibung	Anzahl	Ausführende Firma
3m.1	Einsetzen der oberen und unteren Insertteile in den Wabenkern an den Lochpositionen, Zusammen-drücken der Insertteile bis zum ersten "Klick"	1 x RC*	Fa.Schütz

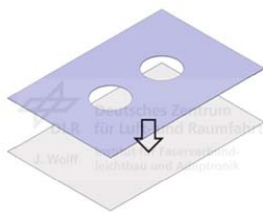
*) = je nach Anzahl der Inserts

Abb. 181: Einbringen der Integrierten Inserts, Klickkonzept.

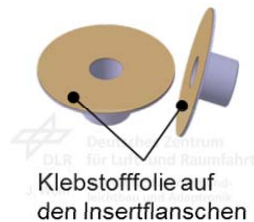
4.4.5.2.6 2015er Steckkonzept V2

Das im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Klickkonzept wurde als Vorlage für eine Weiterentwicklung genutzt, bei der die erste Raststufe (die bei der Handmontage zusammengesteckt wird) durch eine leichte Übermaßpassung, die zweite Stufe (die durch die Presse eingeschoben wird) durch eine starke Übermaßpassung erreicht wird. Dadurch wird der komplex zu fertigende Rastnasenmechanismus eingespart. vgl. Abb. 117.

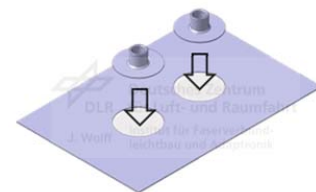
Aktuell wurde vom DLR ein CAD-Modell für ein zweiteiliges integriertes Insert generiert und ein Fertigungskonzept entwickelt, vgl. Abb. 117.



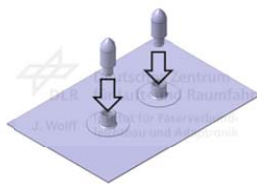
1. Auflage einer Schablone auf die untere Deckschicht des Sandwichs.



2. Abziehen der Schutzfolie von den Klebstoffflächen der Insertunterteile.



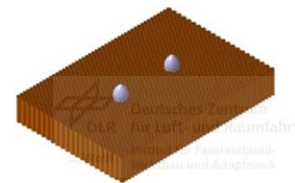
3. Aufkleben der Insertunterteile, Führung durch Schablonenbohrungen.



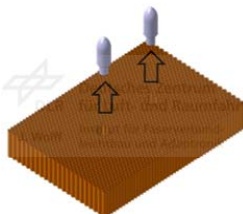
4. Aufstecken der Führungsdorne in die Unterteile der Inserts.



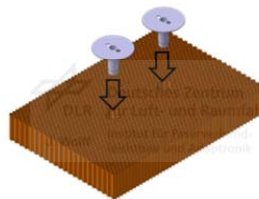
5. Entfernung der Schablone.



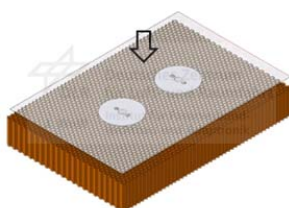
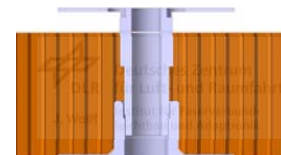
6. Aufstecken des Honigwabenkerns auf die Führungsdorne.



7. Entfernen der der Führungsdorne.



8. Einstecken der Insertoberteile per Hand bis zum ersten Rastpunkt.



Schritt 9: Auflegen der oberen Prepreg-Deckschicht.



Schritt 10: Während des Zufahrens der Presse werden die Insertteile in die zweite Raststufe ineinander geschoben.

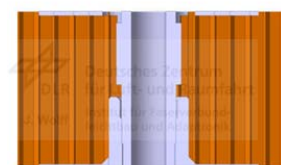


Abb. 182: Montageablauf und Funktionsprinzip des integrierten Inserts, Steckkonzept V2.

4.4.5.3 Festlegung der Testkonfigurationen

Es wurde gemeinsam mit der Fa. SELL GmbH entschieden, das Schraubkonzept im 618 HC Sandwichtyp, das Steckkonzept im 616 HC-Sandwichtyp zu testen, da das Schraubkonzept für den schmalen 616 HC-Sandwichtyp eine zu geringe Gewindetiefe für den Lastanschluss bietet, vgl. Abschnitt 2.4.5.2.2 sowie 2.4.5.2.3.

Das Klickkonzept ist eine Weiterentwicklung aus den Ergebnissen der Fertigungsuntersuchungen des Schraub- und des Steckkonzepts und wurde erst im Halbjahr 2014/2 entwickelt, es kann daher im Projekt InGa keiner mechanischen Untersuchung mehr unterzogen werden.

Wie bereits in Abschnitt 2.4.5.1 beschrieben stand bei der Konzeptfindung zum „Integrierten Insert“ nicht die mechanische Leistungsfähigkeit, sondern eine Optimierung des Fertigungsablaufs im Vordergrund. Daher wurde zunächst auf eine Ausentwicklung des Insertkörpers verzichtet und auf unterschiedliche Halbzeuge des Herstellers Fa. bigHead Bonding Fasteners Ltd zurückgegriffen, die z. T. nachbearbeitet wurden.

Variiert und getestet wurden die folgenden Parameter:

11. Testarten: 2 (Pull-Out und Sheartests)
12. Konzeptanzahl: 1 (Schraub- und Steckkonzept der integrierten Inserts)
13. Sandwichtypen: 2 (SELL-Bezeichnung 616 HC, 10 mm sowie SELL-Bezeichnung 618 HC, 22 mm Gesamthöhe)
14. Verstärkungstypen: 4 (unverstärkt, Verstärkungsdoubler zugseitig, zugabgewandt, beidseitig)
15. Anzahl der Proben pro Konfiguration: 5

Damit ergibt sich der folgende Probenumfang:

$$2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 5 = 80 \text{ Probekörper} \quad [-] \quad (4)$$

4.4.5.4 Dimensionierung

Aufgrund der vergleichsweise geringen Gesamtdurchmesser der Kragen der Insertkonzepte wurden die Testsandwichpaneele in den gleichen Größen wie die Testpaneele der 1993er und 2013er-SELL-Tests festgelegt. Damit ist eine direkte Vergleichbarkeit gewährleistet. Die Zeichnungen zu den Insert-Sandwichprobekörpern wurden vom DLR FA FLB erstellt und der FA. SELL GmbH für den Zuschnitt der Sandwichpaneele zur Verfügung gestellt, siehe Abb. 118 bis Abb. 121.

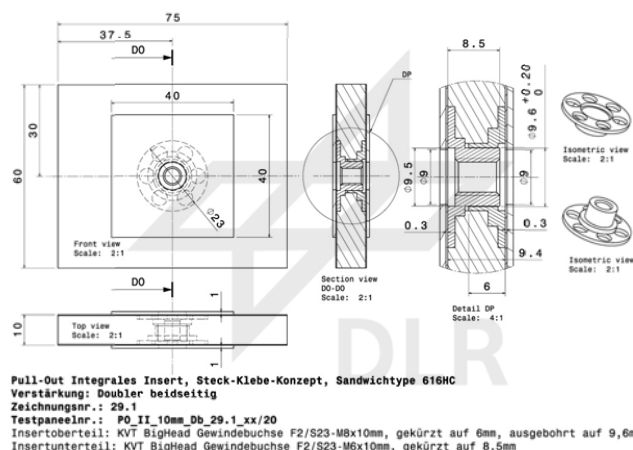


Abb. 183: Dimensionen der 616 HC-Sandwichprobekörper inkl. integriertem Insert (Steckkonzept) für Pull-Out-Versuche, Beispiel mit beidseitiger Deckschichtverstärkung.

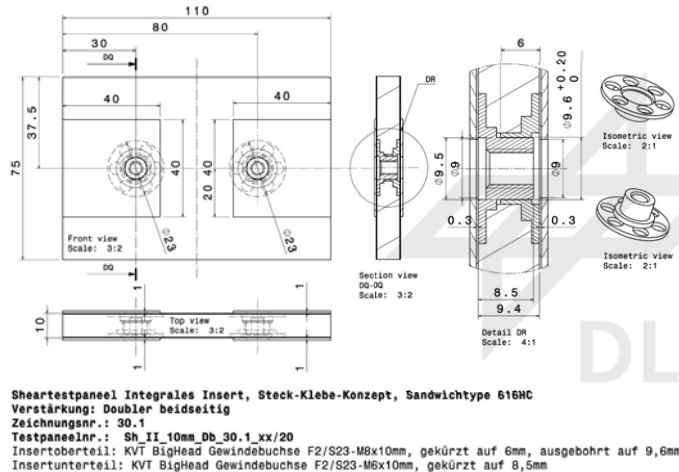


Abb. 184: Dimensionen der 616 HC-Sandwichprobekörper inkl. integrierten Inserts (Steckkonzept) für Shear-Versuche, Beispiel mit beidseitiger Deckschichtverstärkung.

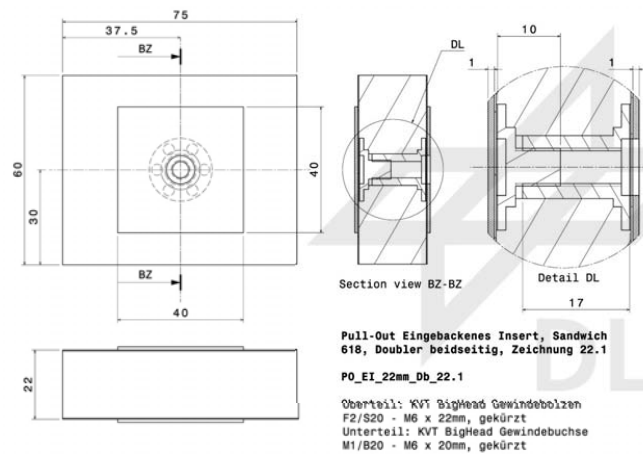


Abb. 185: Dimensionen der 618 HC-Sandwichprobekörper inkl. integriertem Insert (Schraubkonzept) für Pull-Out-Versuche, Beispiel mit beidseitiger Deckschichtverstärkung.

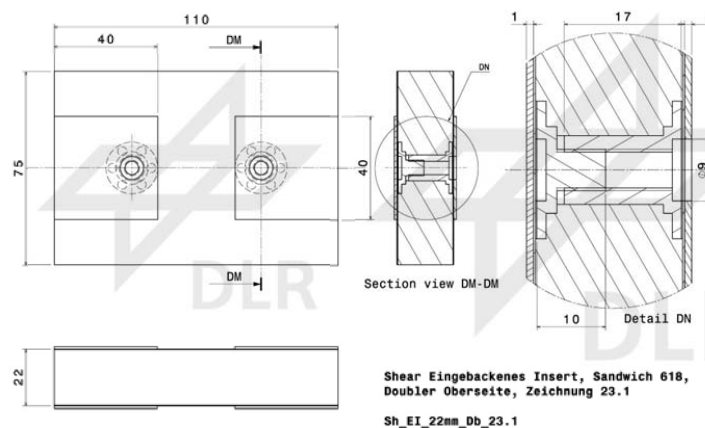


Abb. 186: Dimensionen der 618 HC-Sandwichprobekörper inkl. integrierten Inserts (Schraubkonzept) für Shear-Versuche (Beispiel mit beidseitiger Deckschichtverstärkung)

Erstellung des Musterplans

Ein Musterplan für den Zuschnitt der Sandwichprobekörper aus den Sandwichplatten der Typen 616 HC und 618 HC inklusiv der integrierten Inserts wurde vom DLR FA FLB angefertigt, geplottet und der Fa. Schütz GmbH & Co. KGaA für die Fertigung zur Verfügung gestellt, vgl. Abb. 122.

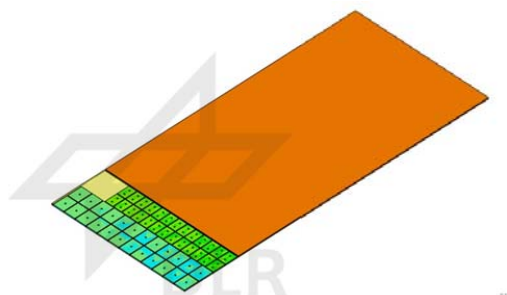


Abb. 187: Musterplan für eine Ableitung des Lochbilds sowie den Zuschnitt der Probekörper der integralen Insertkonzepte

4.4.5.5 Fertigung

Fertigung der Sandwichplatten mit integrierten Inserts

Die Fertigung sowohl des Sandwichtyps 618 HC inkl. der integrierten Inserts „Schraubkonzept“ als auch des Sandwichtyps 618 HC inkl. der integrierten Inserts „Steckkonzept“ erfolgte bei der Fa. Schütz GmbH & Co. KGaA unter Teilnahme von Vertretern der Fa. SELL GmbH sowie des DLR FA FLB.

Die Fertigung der Sandwichplatten inkl. der Steckkonzeptinserts und der Schraubkonzeptinserts sind ähnlich, deshalb wird im Folgenden stellvertretend nur die Fertigung des Steckkonzepts erläutert.

Fertigung Steckkonzept

Zunächst erfolgte der Aufbau der unteren Deckschicht durch Auflegen der notwendigen Einzelschichten (Aluminiumpressplatte, Trennfolie, Glasfaserprepreg, Tüll). Auf diesen Aufbau wurde der Wabenkernkörper aufgelegt und ausgerichtet, vgl. auch Abschnitt 2.3.1 ab Seite 71.

Mit Hilfe eines Lochbildplots im Maßstab 1:1 als Positionierungshilfe wurden von Hand mit einem Locheisen Löcher aus dem Wabenhalbzeug ausgestanzt, siehe Abb. 123.

Die unteren Inserthalbkörper wurden von unten in die Löcher des liegenden Wabenkörper gesetzt, vgl. auch Abb. 103, Seite 123. Die Insertkragen wurden durch Eindrücken der Waben (sog. „Crushing“) in das Wabenhalbzeug gedrückt, vgl. Abb. 106, Seite 123.

Die Zentralzylinder wurden mit Klebstoff versehen und die oberen Inserthalbkörper aufgesteckt und ebenfalls in das Wabenhalbzeug eingedrückt, vgl. Abb. 104 und Abb. 105, Seite 123. Die Rückfederkraft der gecrushten Waben unter den Insertkragen führte zu einem Auseinandergleiten sowie einem Verrutschen der Inserthalbkörper von- bzw. gegeneinander, siehe Abb. 108, Seite 124. Durch mehrmaliges Zurückdrücken konnte dennoch erreicht werden, dass alle Inserthalbkörper konzentrisch und gleitend aufeinander saßen, vgl. Abb. 109, Seite 124.

Nach einer Endkontrolle des Sitzes der Inserthalbkörper zueinander wurde der Aufbau der oberen Deckschicht vorgenommen (Tüll, Glasfaserprepreg, Trennfolie, Aluminiumpressplatte).

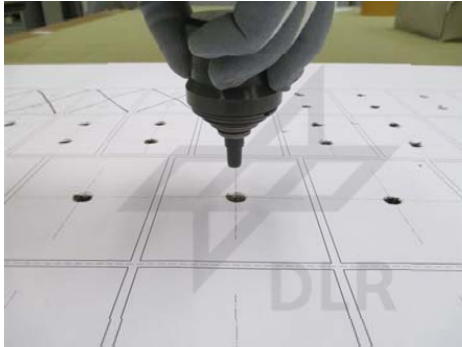


Abb. 188: Manuelles Ausstanzen der Löcher für die Inserts, Positionsfindung mit Hilfe eines Lochbildplots.

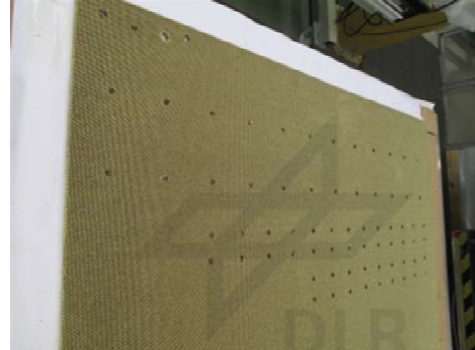


Abb. 189: Ausgestanztes Lochbild im Wabenhalbzeug.



Abb. 190: Endkontrolle der planen Position der Insertkragen.



Abb. 191: Auflegen der Prepreg-Deckschichten. Genauere Beschreibung des Lagenaufbaus siehe Abschnitt 0, Seite 71.

Der Sandwichaufbau wurde anschließend unter Druck und erhöhter Temperatur in einer Presse zum Sandwichhalbzeug mit integrierten Inserts ausgehärtet.

Zuschnitt der Sandwichplatte zu Probekörpern

Es wurden pro Sandwichtyp (616 HC und 618 HC) 24 Pull-Out-Proben sowie 26 Shear-Proben ausgeschnitten.

Freilegen der Schraubenlöcher

Der Zugang zum Zentralgewinde der integrierten Inserts wurde durch Aufbohren der Deckschicht auf einer Seite der Probekörper hergestellt. Hier hat sich ein Kegelsenker besser bewährt als ein herkömmlicher Bohrer für Metallwerkstoffe, dieser zeigte ein starkes „Rupfen“ sowie einen sehr unsauberen Bohrbild. Evtl. überstehende Einzelfasern bzw. Rovingreste wurden mit Cutterschnitten entfernt, siehe Abb. 127 und Abb. 128.

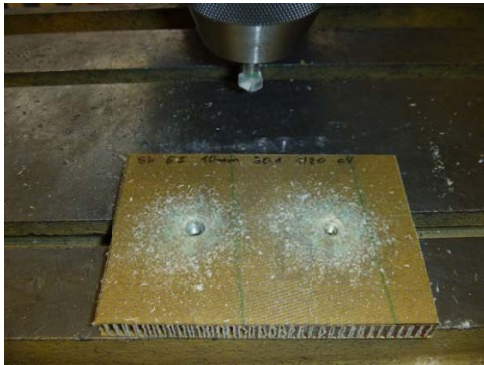


Abb. 192: Herstellung des Zugangs zur Zentralgewindebohrung der Inserts durch Aufbohren der Deckschichten mit einem Kegelsenker.



Abb. 193: Entgraten der Bohrungsränder mit Hilfe eines Handcutters.

Reinigung und der Sandwichpaneele

Die anschließende Reinigung der Sandwichpaneele erfolgte durch Absaugen des Säge- und Bohrstaubes sowie Abwischen der zu verklebenden Bereiche mit Aceton getränkten, fusselfreien Papiertüchern. Bei der Fa. SELL GmbH wird statt Aceton das Produkt „Metaclean“ zur Vorbehandlung eingesetzt, nach Absprache mit der Fertigung der Fa. SELL GmbH sind die Reinigungswirkungen jedoch vergleichbar und haben somit auf die Versuchsergebnisse keinen relevanten Einfluss.

4.4.5.6 Tests der integrierten Schraub- und Steckinsertkonzepte

Es wurden sowohl transversale (Pull-Out) als auch flächenparallele (Shear) Belastungstests an den Topfinserkonzepten durchgeführt. Die Testgrundlagen und Voraussetzungen, der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die Dokumentation der Tests per Kraft-Weg-Messung, Video und Fotoaufnahmen sowie Mitschriften wird in Abschnitt 2.5.5, ab Seite 179 näher erläutert. Eine Spezifikation der Tests ist ebenfalls im Dokument der Fa. SELL GmbH dokumentiert: „Zerlik_R_Testreport_Innovative_Inserts_SELL_K-1156ALL-1001-22_Rev._new.docx“.

Die Verschraubungen zwischen den Testpaneelen für die Shear-Tests und den Aufnahmen der Testmaschine konnten zum Teil nicht auf die für die Verschraubungen notwendige Vorspannkraft angezogen werden, die Abweichungen sind in der folgenden Tab. 15 dokumentiert.

No	Testpaneele	Drehmoment
5	SH_EI_10mm_oV_30. 1	Festziehen der Verschraubungen mit 4 Nm nur teilweise möglich, da sich sonst teilweises Ablösen der Inserts innen von der Deckschicht auf der Krafteinleitungsseite. Dies ist durch Knistern zu hören und durch hellgelbe Einfärbung der abgelösten Bereiche sichtbar. Daher werden die Schrauben in den Tests nur noch handfest angezogen.
6	SH_EI_10mm_Do_30. 1	Festziehen der Verschraubungen mit 4 Nm möglich, die Doubler auf Krafteinleitungsseite verteilen die Anpresskraft der Schraube. Ein weiteres Anziehen über 4 Nm hinaus führt zu Knistern; hier vermutlich ein teilweises Ablösen der Inserts innen von der Deckschicht auf Lasteinleitungsseite.
7	SH_EI_10mm_Du_30. 1	Festziehen der Verschraubungen mit 4 Nm nur teilweise möglich, da bei 4 Nm Anzugsmoment ein teilweises Ablösen der Inserts innen von der Deckschicht auf der Krafteinleitungsseite resultiert. Dies ist durch Knistern zu hören und durch hellgelbe Einfärbung der abgelösten Bereiche sichtbar. Daher werden die Schrauben in den Tests nur noch handfest angezogen.
8	SH_EI_10mm_Db_30. 1	Festziehen der Verschraubungen mit 4 Nm möglich, die Doubler auf Krafteinleitungsseite verteilen die Anpresskraft der Schraube. Ein weiteres Anziehen über 4 Nm hinaus führt zu Knistern; hier vermutlich ein teilweises Ablösen der Inserts innen von der Deckschicht auf Lasteinleitungsseite.
13	SH_EI_22mm_oV_23. 1	Ein Anziehen der Verschraubungen mit 4-5 Nm ist noch möglich; ein weiteres Anziehen über 5 Nm hinaus führt zu Knistern, hörbar durch Knistern, sichtbar durch hellgelbe Einfärbung der abgelösten Bereiche im Insertkopfbereich.
14	SH_EI_22mm_Do_23. 1	Ein Anziehen mit 4 Nm ist noch möglich; die Doubler auf Krafteinleitungsseite verteilen die Anpresskraft der Schraube. Ein weiteres Anziehen über 4 Nm hinaus führt zu Knistern; hier vermutlich ein teilweises Ablösen der Inserts innen von der Deckschicht auf Lasteinleitungsseite.
15	SH_EI_22mm_Du_23. 1	Ein Anziehen mit 4 Nm ist möglich und wird bei allen Shearproben durchgeführt.
16	SH_EI_22mm_Db_23. 1	<ul style="list-style-type: none"> Probe 15: Anziehen mit 4 Nm möglich; die Doubler auf Kraftweinleitungsseite verteilen die Anpresskraft der Schraube. Vermutung des leichten Durchrutschens der Aluminiumblöcke unter den Schrauben beim Test. Probe 16: Anzug der Verschraubung mit 4 Nm. Proben 17 – 20: Erhöhung des Anzugsmoments der Schraube auf 6 Nm; dies ist bei leichtem Knistern möglich; Vermutung des AblöSENS der Inserts innen von der Deckschicht auf Lasteinleitungsseite; dies wird jedoch akzeptiert, da die Vorspannkraft der Schraube nun ausreicht um ein Verrutschen der Aluminiumblöcke zu verhindern.

Tab. 20: Drehmomente der Schrauben für die Sheartests der integrierten Inserts.

4.4.5.6.1 Testergebnisse

Die Testergebnisse (die aufgenommenen Kraft-Weg-Kurven) für die Pull-Out- und die Sheartests können dem entsprechenden Testbericht entnommen werden.

4.4.5.6.2 Festigkeitsberechnung unter transversaler und flächenparalleler Belastung

Die Berechnung der Festigkeiten der integrierten Inserts unter transversaler als auch flächenparalleler Belastung aus den Rohdaten erfolgte nach der in Abschnitt 2.5.6 dargestellten Vorgehensweise, Ergebnisse siehe Tab. 16 sowie Tab. 17.

4.4.5.6.3 Berechnung der Mittelwerte der Maximallasten, statistische Auswertung

Das allgemeine Vorgehen ist in Kapitel Abschnitt 2.5.6 beschrieben, Ergebnisse für die Konzepte der integrierten Inserts: siehe Tab. 16 sowie Tab. 17.

4.4.5.6.4 Massenbestimmung der Einzelkomponenten

Die Gewichtsbestimmung der Einzelteile der Insertlasteinleitungen mit integrierten Inserts erfolgte nach dem in Kapitel 2.6 beschriebenen Verfahren.

4.4.5.6.5 Bestimmung der Verbindungsgüten der Varianten der integrierten Inserts

Die Verbindungsgüten wurden unter Nutzung der aus den Testergebnissen berechneten Festigkeiten sowie der Massen berechnet, das allgemeine Vorgehen ist in Abschnitt 2.6, ab Seite 181 beschrieben. Die Ergebnisse für die Topfininsertkonzepte sind in Tab. 16 sowie Tab. 17 dargestellt.

4.4.5.7 Ergebnisübersicht

In den folgenden beiden Tabellen sind die mittleren Festigkeiten, Massen sowie Verbindungsgüten der Topfininsertkonzepte zusammengefasst dargestellt, dies unter transversaler Belastung (Tab. 16) bzw. flächenparalleler Belastung (Tab. 17)

Weiterführende Informationen sind dem Dokument zu entnehmen:

„Zerlik_R_Testreport_Innovative_Inserts_K-1156ALL-1001-22_SELL_Rev_new.docx“

Die Informationen zu den mittleren Versagenslasten sind den Dokumenten zu entnehmen:

„F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FTr\02_Results_clean_innov_Inserts_2014“

Die Informationen zu den Massenberechnungen sind den Dokumenten zu entnehmen: „2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx“

Insertkonzept	Integrierte Inserts	
Insertmaterial	Alu	Alu
Sandwichtyp	616 HC (10 mm)	618 HC (22 mm)
Ohne Verstärkung		
Mittlere Versagenslast	814,64 N	755,34 N
Gesamtgewicht	9,12 g	12,55 g
Verbindungsgüte	89,32 N/g	60,19 N/g
Mit Verstärkung auf der lastzugewandten Seite („Doubler oben“)		
Mittlere Versagenslast	/ N	/ N
Gesamtgewicht	12,21 g	16,53 g
Verbindungsgüte	/ N/g	/ N/g
Mit Verstärkung auf der lastabgewandten Seite („Doubler unten“)		
Mittlere Versagenslast	/ N	/ N
Gesamtgewicht	13,15 g	16,86 g
Verbindungsgüte	/ N/g	/ N/g
Mit Verstärkung auf beiden Seite („Doubler beidseitig“)		
Mittlere Versagenslast	N	4644 N
Gesamtgewicht	17,36 g	20,91 g
Verbindungsgüte	/ N/g	/ N/g

Tab. 21: Integrierte Insertkonzepte unter transversaler (Pull-Out) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.¹²

¹² Quellen:

F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FT\02_Results_clean_innov_Inserts_2014, Mittlere Gewichte: 2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx

Insertkonzept	Integrierte Inserts	
Insertmaterial	Alu	Alu
Sandwichtyp	616 HC (10 mm)	618 HC (22 mm)
Ohne Verstärkung		
Mittlere Versagenslast	N	657,28 N
Gesamtgewicht	9,303 g	12,582 g
Verbindungsgüte	/ N/g	52,24 N/g
Mit Verstärkung auf der lastzugewandten Seite („Doubler oben“)		
Mittlere Versagenslast	N	N
Gesamtgewicht	12,54 g	16,66 g
Verbindungsgüte	/ N/g	/ N/g
Mit Verstärkung auf der lastabgewandten Seite („Doubler unten“)		
Mittlere Versagenslast	/ N	/ N
Gesamtgewicht	13,52 g	16,93 g
Verbindungsgüte	/ N/g	/ N/g
Mit Verstärkung auf beiden Seite („Doubler beidseitig“)		
Mittlere Versagenslast	/ N	/ N
Gesamtgewicht	17,52 g	20,89 g
Verbindungsgüte	/ N/g	/ N/g

Tab. 22: Integrierte Insertkonzepte unter flächenparalleler (Shear) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte. Schraube.¹³

4.4.5.8 Leistungsvergleich zu konventionellen Inserts

Die integrierten Inserts schließen im Leistungsvergleich über die Verbindungsgüte sowohl unter transversaler als auch flächenparalleler Belastung schlecht ab, siehe Abb. 129 und Abb. 130. Die Konzeptentwicklung der integrierten Inserts hatte jedoch eine vereinfachte Fertigung zum Schwerpunkt (Integration der Inserts in den Sandwichkern vor Fertigung der Sandwichplatte) und wurde daher nicht unter mechanischen Gesichtspunkten formoptimiert. Durch eine Formoptimierung sind wesentlich bessere VBG zu erwarten.

¹³ Quellen:

F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FT102_Results_clean_innov_Inserts_2014

Mittlere Gewichte: 2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx

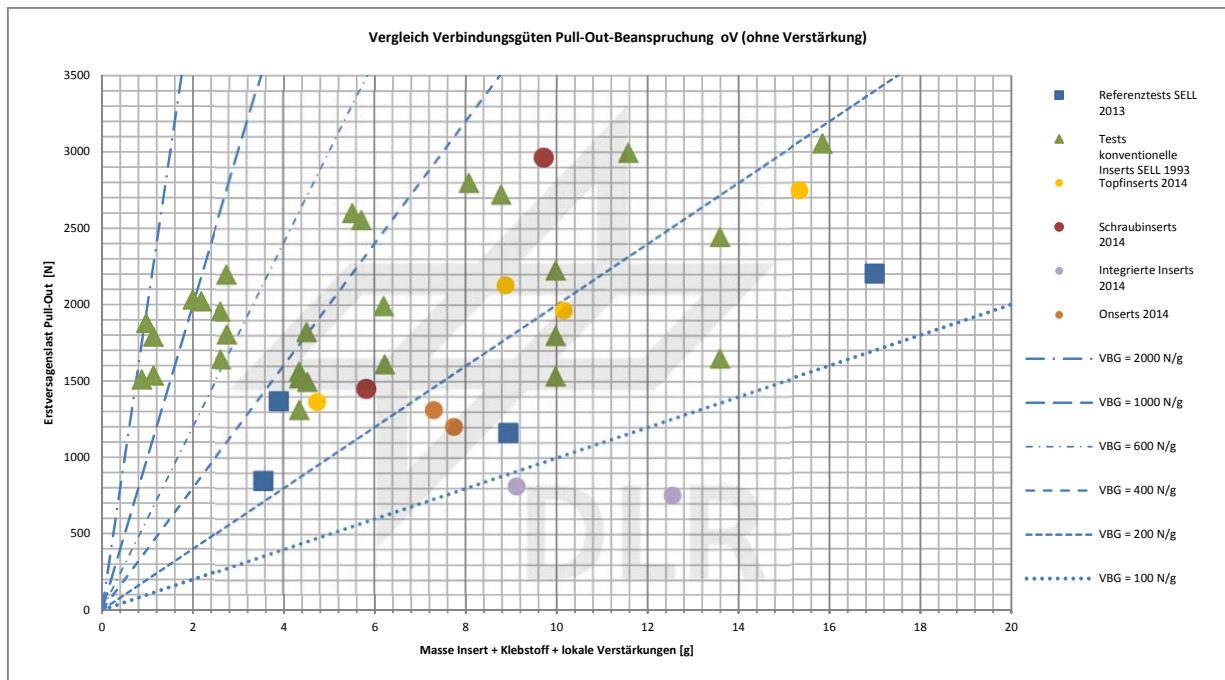


Abb. 194: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter transversaler Belastung (Pull-Out).¹⁴

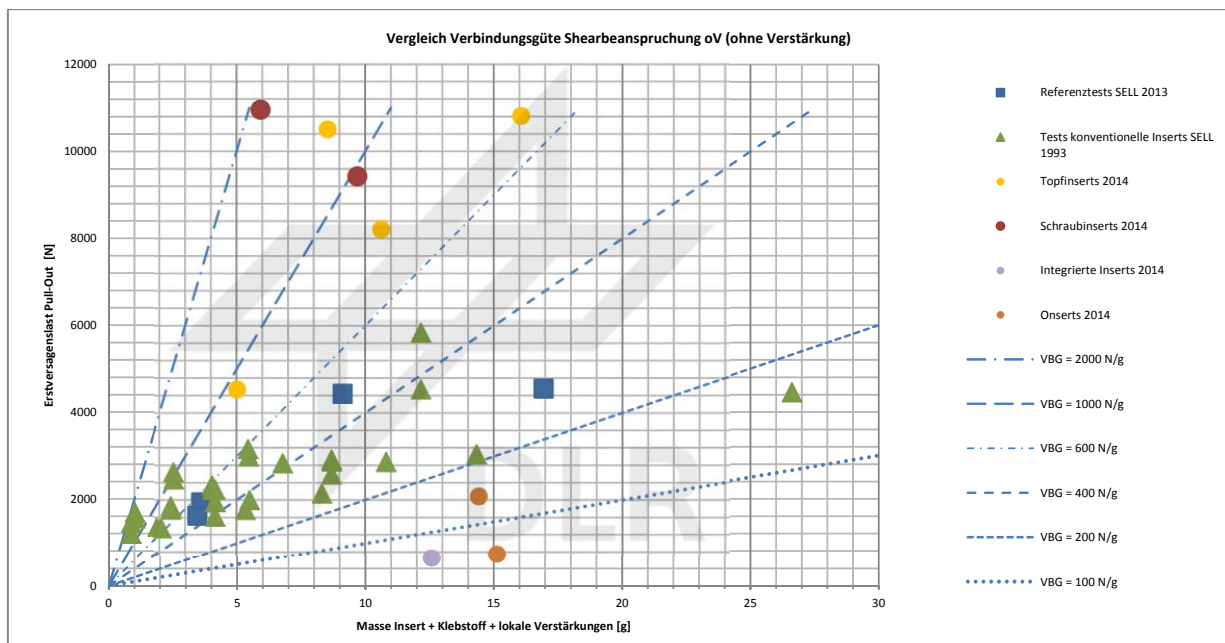


Abb. 195: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter flächenparalleler Belastung (Shear).¹⁵

¹⁴ Quelle: 2015-05-04_InGa_Pull_Out-Werte_P_m_konv+inno_Inserts_v01_JWo.xlsx
Quelle: 2015-05-05_InGa_Shear-Werte_P_m_konv+inno_Inserts_v02_JWo.xlsx

4.4.5.9 Anfertigung von Schnittdemonstratoren sowie Installation in der Demonstratorgalley

Es wurden Schnittdemonstratoren mit Topfinertverbindungen angefertigt sowie Topfinerts in der Demonstratorgalley des Projekts InGa installiert, siehe Abschnitt 2.8 ab Seite 185.

4.4.5.10 Lessons learned: Empfehlungen für Weiterentwicklungen

Eine Formausentwicklung der Steck- und der Schraubinsertkonzepte, um Verbindungsgüte zu erhöhen. Siehe Klickkonzept sowie Steckkonzept V2, Abschnitt 2.4.5.2.4 und Abschnitt 2.4.5.2.6.

¹⁵ Quelle: 2015-05-04_InGa_Pull_Out-Werte_P_m_konv+inno_Inserts_v01_JWo.xlsx

4.4.6 Onserts

4.4.6.1 Problemstellung in der konventionellen Galley

Zur Befestigung der Erdungsverkabelung der SELL-Galleys werden konventionelle Inserts 1836-03-11 verwendet, siehe Abb. 131. Dafür müssen in regelmäßigen Abständen Bohrungen in die Außensandwichpaneele der Galleys gesetzt werden. Die Inserts werden mit einer vergleichsweise großen Menge Klebstoff eingesetzt, da die angebohrten Wabenzellen des Kerns im Bohrungsbereich mit ausfüllen werden müssen. Die große Anzahl an Einzelteilen (Kabel, Schraube, Klammer) bringt einen hohen Montageaufwand sowie ein hohes Gewicht mit sich. Die auf die Erdungskabelhalterungen wirkenden Kräfte und Momente sind auf Grund der geringen Masse der Kabel sowie der geringen Abstände zwischen den Haltern jedoch vergleichsweise klein.

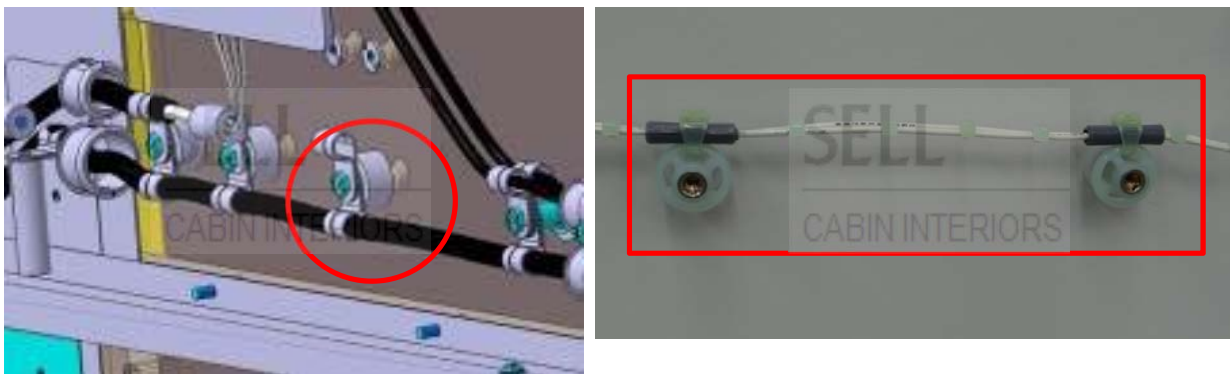


Abb. 196: CAD-Modell und Realbeispiel einer Erdungskabelanbindung mit Insert, Schraube, Distanzbuchse und Klammer. (40)

4.4.6.2 Konzeptentwicklung

4.4.6.2.1 Konzeptansatz

Als Alternative zum Insert wird das Onsert zur Erdungskabelanbindung eingesetzt, das per Verklebung direkt auf die Deckschicht des Sandwichpaneels aufgebracht wird. Bei der Verwendung von Onserts kann die Schraube, der Abstandshalter und die Befestigungsschelle der Erdungsverkabelung durch z. B. einfach zu installierende und leichte Kabelbinder ersetzt werden. Die auftretenden Kräfte sind vergleichsweise klein und werden von den ausgewählten Onserts problemlos ertragen.



Abb. 197: Onsert mit Kabelbinderaufnahme.



Abb. 198: Onsertkonzepte mit durchsichtigem Fuß zur UV-Aushärtung des Klebstoffs (44).

4.4.6.2.2 Vorteile der Onserts

Vom Onserteinsatz wird sich in erster Linie eine große Gewichtsersparnis bzw. starke Erhöhung der Verbindungsgüte gegenüber den konventionellen Inserts versprochen. Darüber hinaus reduzieren sich der Material- und Montageaufwand sowie der Zeitbedarf enorm, da Bohrungen entfallen und weniger Einzelteile installiert werden müssen. Weiterhin wird das Struktursandwich nicht durch die Bohrungen geschädigt und damit die Robustheit der Struktur bewahrt.

4.4.6.2.3 Onsertvarianten

In die engere Auswahl kamen zwei Onsertsysteme. Der Vorteil des Onsertsystems ONsert® der Fa. Böllhoff Verbindungstechnik GmbH & Co. KG liegt in einer schnellen Aushärtung des Klebstoffs durch UV-Licht, so dass das Onsert bereits nach wenigen Minuten voll nutzbar bzw. belastbar ist, siehe Abb. 135. Der Klebstoff ist jedoch nicht luftfahrtzugelassen, eine Zertifizierung sehr aufwendig.

Für die Positionierung und Fixierung der Onserts der Fa. Click Bond. Inc. hingegen wird für die Dauer des Klebstoffaushärtevorgangs eine wiederverwendbare Kunststoffbrücke verwendet, die über Klebestreifen auf der Sandwichoberfläche befestigt wird und das Onsert mit der korrekten Kraft auf die Sandwichoberfläche aufdrückt, siehe Abb. 134. Der Vorteil des Click Bond-Onserts ist, dass eine große Bandbreite an Klebstoffen genutzt werden kann, unter anderem auch der luftfahrtzertifizierte, bei der Fa. SELL als Standardklebstoff etablierte 3M Scotch Weld 9300 B/A FST, siehe auch Abschnitt 2.3.2, Seite 76.

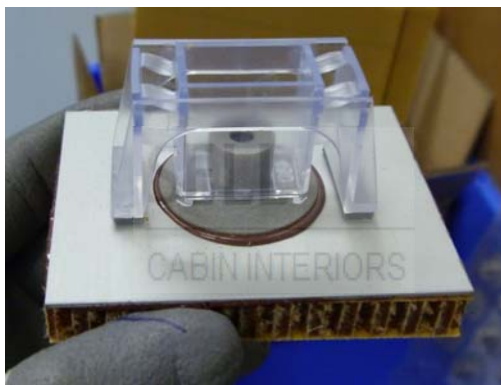


Abb. 199: Onserttyp CB4002 der Fa. Click Bond. Inc., mit dem Klebstoff 3M Scotch Weld 9300 B/A FST auf der Sandwichdeckschicht fixiert. Für den Aushärtevorgang wird das Insert über eine wiederverwertbare Kunststoffbrücke an seiner Position gehalten und angepresst [www.clickbond.com].



Abb. 200: Onsertsystem ONsert® der Fa. Böllhoff Verbindungstechnik GmbH & Co. KG. Das Onsert wird mit UV-aushärtendem Klebstoff befestigt [www.boellhoff.de].

4.4.6.3 Festlegung der Testkonfigurationen

Die Auswahl der Onserttypen oblag der Fa. SELL GmbH, die die Onserttypen CB4002 V 3 CR 8 und CB4564 V-3-12 P der Fa. Click Bond. Inc. auswählte, siehe Abb. 136 und Abb. 137.



Abb. 201: Onsert der Serie CB4002 der Fa. Click Bond. Inc.



Abb. 202: Onsert der Serie CB4564 der Fa. Click Bond. Inc.

Alle Onsertprobekörper sind Zukaufteile, Hersteller ist Fa. Click Bond. Inc.. Ausgewählt wurden die Onserttypen mit den Bezeichnungen CB4002 V 3 CR 8 sowie CB4564 V-3-12 P. Die genauen Daten sind den Datenblättern zu entnehmen:

- „Datenblatt_Onsert_mit_Innengewinde_CB4002_Click_Bond_DB_2008.pdf“
- „Datenblatt_Onsert_mit_Kabelbinderhalterung_CB4564_Click_Bond_DB_2010.pdf“.

Variiert und getestet wurden die folgenden Parameter:

16. Testarten: 2 (Pull-Out und Sheartests)
17. Konzeptanzahl: 2 (Onserts der Serie CB4002 sowie CB4564)
18. Sandwichtypen: 1 (SELL-Bezeichnung 616 HC, 10 mm Gesamthöhe)
19. Verstärkungstypen: 2 (unverstärkt und mit Verstärkungsdoubler zugseitig, „Doubler oben“)
20. Anzahl der Proben pro Konfiguration: 5

Damit ergibt sich der folgende Probenumfang:

$$2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 5 = 40 \text{ Probekörper} \quad [-] \quad (5)$$

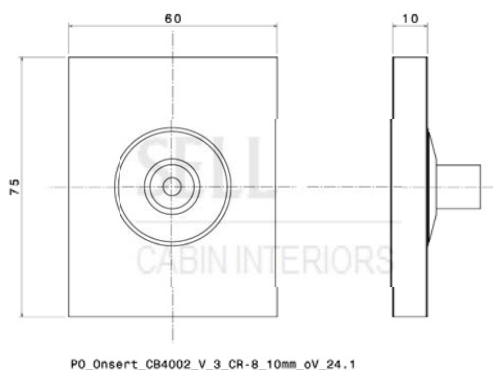
4.4.6.4 Onsert-Sandwichprobekörper

4.4.6.4.1 Dimensionierung

Für beide Onsertkonzepte wurde von der Fa. SELL GmbH erbeten, dass sowohl die Pull-Out- als auch die Sheartests auf Sandwichprobekörpern in der Standardgrößen (Pull-Out: 75 x 60 mm, Shear: 110 x 75 mm) durchgeführt werden. Damit ist eine direkte Vergleichbarkeit zu den bereits getesteten Inserts gegeben. Daraus ergeben sich die auf den Abb. 138 bis Abb. 141 dargestellten Onsert-Sandwichprobekörper.

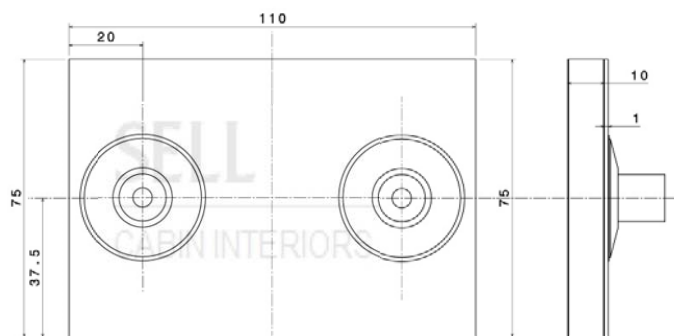
Getestet wurden die Onserts nur auf dem schmalen Sandwichtyp 616 HC.

Da das in Abschnitt 0 ab Seite 85 beschriebene Problem des Versagens des Sandwichprobekörpers vor dem Versagen der Insertverbindung durch einen zu kleinen bzw. einen unzureichend eingespannten Sandwichprobekörper auch bei den Onsert-Sandwichprobekörpern in Standardgröße erwartet wurde, wurde eine weitere Probereihe zur Validierung mit dem Onserttyp CB4002 V 3 CR 8 auf einem größeren Testsandwichpaneel durchgeführt, siehe Abb. 142.



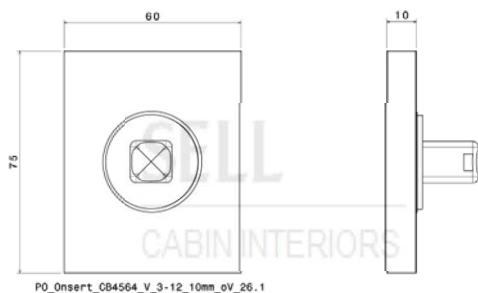
P0_Onsert_CB4002_V_3_CR-8_10mm_oV_24.1

Abb. 203: Dimensionen des Pull-Out-Sandwichprobekörpers des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4002 V 3 CR 8



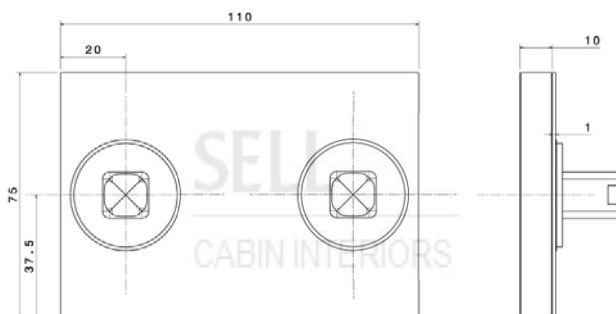
Sh_Onsert_CB4002_V_3_CR-8_10mm_Do_25.1

Abb. 204: Dimensionen des Shear-Sandwichprobekörpers des Typs 616 HC in Standardgröße mit Onserts des Typs CB4002 V 3 CR 8 mit Deckschichtverstärkung oben



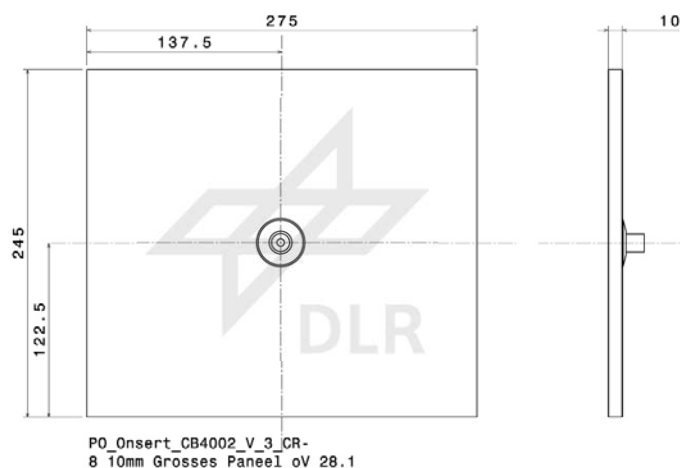
P0_Onsert_CB4564_V_3-12_10mm_oV_26.1

Abb. 205: Dimensionen des Pull-Out-Sandwichprobekörpers des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4564 V-3-12 P



Sh_Onsert_CB4564_V_3-12_10mm_Do_27.1

Abb. 206: Dimensionen des Shear-Sandwichprobekörpers des Typs 616 HC in Standardgröße mit Onserts des Typs CB4564 V-3-12 P mit Deckschichtverstärkung oben



P0_Onsert_CB4002_V_3_CR-8_10mm_Grösses_PaneeI_oV_28.1

Abb. 207: Dimensionen des Pull-Out-Sandwichprobekörpers des Typs 616 HC in vom DLR FA FLB vorgeschlagener Größe mit dem Onserttyp CB4002 V 3 CR 8

4.4.6.4.2 Fertigung

Die Beschreibung des Aufbaus der Probekörper für die Tests der Onserts erfolgte bei der Fa. SELL GmbH. Im Folgenden wird daher nur beispielhaft eine graphische Übersicht über die Onsert-Sandwichprobekörper gegeben.



Abb. 208: Pull-Out-Sandwichprobekörper des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4002 V 3 CR 8.



Abb. 209: Pull-Out-Sandwichprobekörper des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4002 V 3 CR 8 mit Deckschichtverstärkung oben.



Abb. 210: Pull-Out-Sandwichprobekörper des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4564 V-3-12 P.



Abb. 211: Pull-Out-Sandwichprobekörper des Typs 616 HC in Standardgröße mit dem Onserttyp CB4564 V-3-12 P mit Deckschichtverstärkung oben.

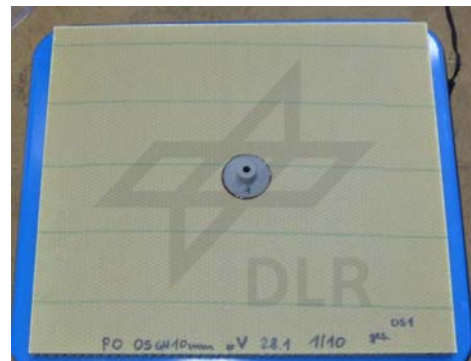


Abb. 212: Pull-Out-Sandwichprobekörper des Typs 616 HC mit erhöhter Größe mit dem Onserttyp CB4002 V 3 CR 8.

Beschriftung der Probekörper

Eine anschließende, beidseitige Beschriftung der Insert-Sandwichtestkörper erfolgte nach dem in Abschnitt 2.5.2.2 dargestellten Schema auf dem Randbereich der Sandwichpaneele.

Auswiegen der Insertkonzepte

Die Massen der Onserttypen wurden durch Auswiegen ermittelt, siehe Abschnitt 4.6.2.

Auswiegen der Gesamtprobekörper

Die fertigen Probekörper wurden ausgewogen, vgl. auch Abschnitt 2.6.4, Seite 183.

4.4.6.5 Test der Onsert-Lasteinleitungen

Es wurden sowohl transversale (Pull-Out) als auch flächenparallele (Shear) Belastungstests an den Topfinserterkonzepten durchgeführt. Die Testgrundlagen und Voraussetzungen, der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die Dokumentation der Tests per Kraft-Weg-Messung, Video und Fotoaufnahmen sowie Mitschriften wird in Abschnitt 2.5.5, ab Seite 179 näher erläutert. Eine Spezifikation der Tests ist ebenfalls im Dokument der Fa. SELL GmbH dokumentiert:

„Zerlik_R_Testreport_Innovative_Inserts_SELL_K-1156ALL-1001-22_Rev._new.docx“

4.4.6.5.1 Testergebnisse

Die Ergebnisse (die aufgenommenen Kraft-Weg-Kurven) für die Pull-Out- und die Sheartests dargestellt können dem entsprechenden Testbericht entnommen werden.

4.4.6.5.2 Festigkeitsberechnung unter transversaler und flächenparalleler Belastung

Die Berechnung der Festigkeiten der Topfinserterkonzepte unter transversaler als auch flächenparalleler Belastung aus den Rohdaten erfolgte nach der in Abschnitt 2.5.6 dargestellten Vorgehensweise, Ergebnisse siehe Tab. 18 sowie Tab. 19.

4.4.6.5.3 Berechnung der Mittelwerte der Maximallasten, statistische Auswertung

Das allgemeine Vorgehen ist in Kapitel Abschnitt 2.5.6 beschrieben, Ergebnisse für die Topfinserterkonzepte: siehe Tab. 18 sowie Tab. 19.

4.4.6.5.4 Massenbestimmung der Einzelkomponenten

Die Gewichtsbestimmung der Einzelteile der Insertlasteinleitungen mit Topfinserterkörpern erfolgte nach dem in Kapitel 2.6 beschriebenen Verfahren.

4.4.6.5.5 Bestimmung der Verbindungsgüten der Topfinsertervarianten

Die Verbindungsgüten wurden unter Nutzung der aus den Testergebnissen berechneten Festigkeiten sowie der Massen berechnet, das allgemeine Vorgehen ist in Abschnitt 2.6, ab Seite 181 beschrieben. Die Ergebnisse für die Topfinserterkonzepte sind in Tab. 18 sowie Tab. 19 dargestellt.

4.4.6.6 Ergebnisübersicht

In den folgenden beiden Tabellen sind die mittleren Festigkeiten, Massen sowie Verbindungsgüten der Onsertkonzepte zusammengefasst dargestellt, dies unter transversaler Belastung (Tab. 18) bzw. flächenparalleler Belastung (Tab. 19).

Weiterführende Informationen sind dem Dokument zu entnehmen:

„Zerlik_R_Testreport_Innovative_Inserts_K-1156ALL-1001-22_SELL_Rev_new.docx“

Die Informationen zu den mittleren Versagenslasten sind den Dokumenten zu entnehmen:

„F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FTr\02_Results_clean_innov_Inserts_2014“

Die Informationen zu den Massenberechnungen sind den Dokumenten zu entnehmen: „2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx“

Insertkonzept	Onserts	
Onserttyp	CB4564 V-3-12 P (KB)	CB4002 V 3 CR 8 (GW)
Sandwichtyp	616 HC (10 mm)	616 HC (10 mm)
Ohne Verstärkung		
Mittlere Versagenslast	1204,2 N	1314,5 N
Gesamtgewicht	7,75 g	7,31 g
Verbindungsgüte	155,38 N/g	179,82 N/g
Mit Verstärkung auf der lastzugewandten Seite („Doubler oben“)		
Mittlere Versagenslast	1053,13 N	2324 N
Gesamtgewicht	20,88 g	20,34 g
Verbindungsgüte	50,44 N/g	114,26 N/g

Tab. 23: Verbindungsgüte der Onserts unter transversaler (Pull-Out) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte. ¹⁶

Insertkonzept	Onserts	
Onserttyp	CB4564 V-3-12 P (KB)	CB4564 V-3-12 P (GW)
Sandwichtyp	616 HC (10 mm)	616 HC (10 mm)
Ohne Verstärkung		
Mittlere Versagenslast	748,4 N	2089,6 N
Gesamtgewicht	14,42 g	15,13 g
Verbindungsgüte	51,9 N/g	138,11 N/g
Mit Verstärkung auf der lastzugewandten Seite („Doubler oben“)		
Mittlere Versagenslast	1002,5 N	2421,2 N
Gesamtgewicht	39,34 g	38,43 g
Verbindungsgüte	25,48 N/g	63 N/g

Tab. 24: Verbindungsgüte der Onserts unter flächenparalleler (Shear) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte. ¹⁷

¹⁶ Quellen:

F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FT\02_Results_clean_innov_Inserts_2014

Mittlere Gewichte: 2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx

¹⁷ Quellen:

F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FT\02_Results_clean_innov_Inserts_2014

Mittlere Gewichte: 2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx

4.4.6.7 Leistungsvergleich zu konventionellen Inserts

Die Onserts (ohne Doublerversärkung) zeigten unter transversaler (Pull-Out) Belastung Verbindungsgüten zwischen 155 – 180 N/kg und liegen damit im unteren Mittelfeld der Standardinserts, Abb. 57.

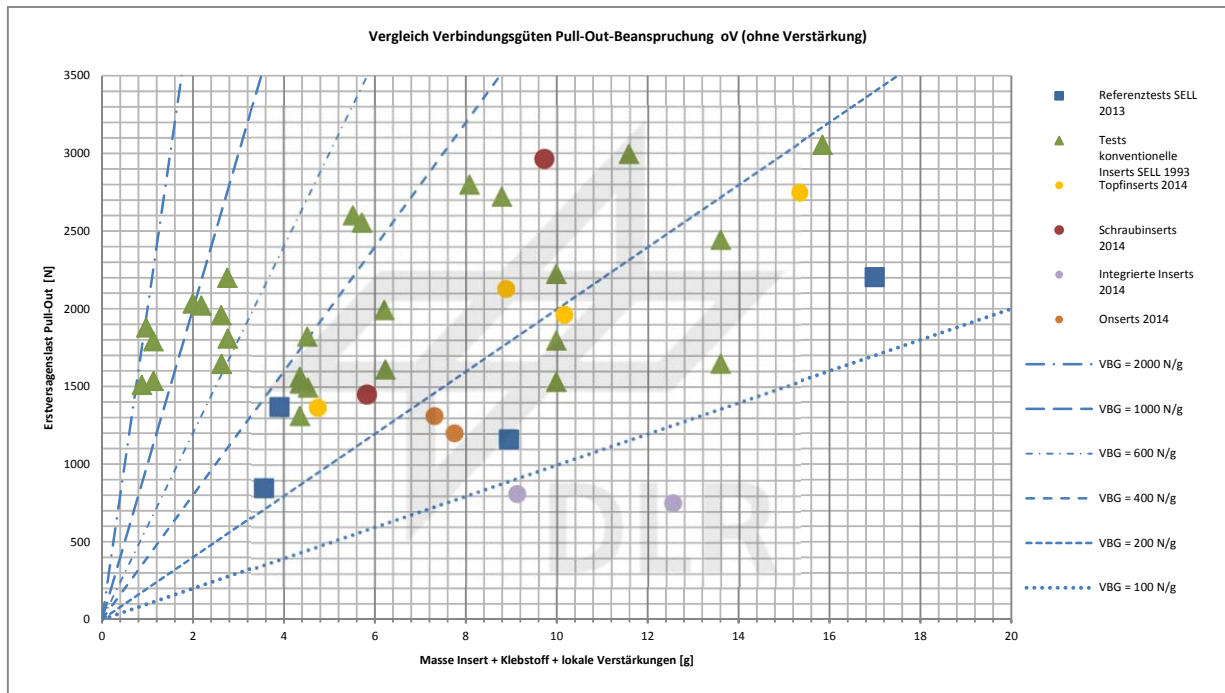


Abb. 213: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter transversaler Belastung (Pull-Out).¹⁸

Die Onserts (ohne Doublerversärkung) zeigten unter flächenparalleler (Shear) Belastung Verbindungsgüten zwischen 52 – 138 N/kg und liegen damit im unteren Mittelfeld der Standardinserts, Abb. 58.

¹⁸ Quelle: 2015-05-04_InGa_Pull_Out-Werte_P_m_konv+inno_Inserts_v01_JWo.xlsx
Quelle: 2015-05-05_InGa_Shear-Werte_P_m_konv+inno_Inserts_v02_JWo.xlsx

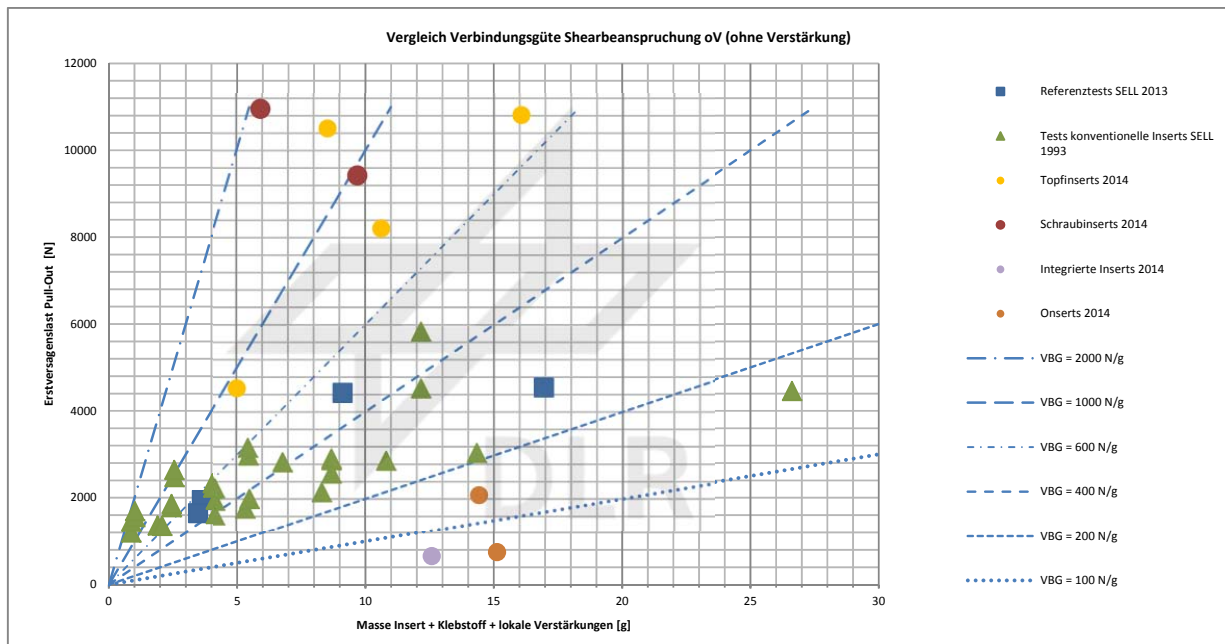


Abb. 214: Vergleich der Verbindungsgüten von lokalen Sandwichlasteinleitungen ohne Schraubenanteil mit konventionellen sowie mit innovativen InGa-Insertkonzepten unter flächenparalleler Belastung (Shear).¹⁹

4.4.6.8 Anfertigung von Schnittdemonstratoren sowie Installation in der Demonstratorgalley

Es wurden Schnittdemonstratoren mit Topfininsertverbindungen angefertigt sowie Topfinserts in der Demonstratorgalley des Projekts InGa installiert, siehe Abschnitt 2.8 ab Seite 185.

4.4.6.9 Lessons learned: Empfehlungen für Weiterentwicklungen

¹⁹ Quelle: 2015-05-04_InGa_Pull_Out-Werte_P_m_konv+inno_Inserts_v01_JWo.xlsx

4.4.7 Randlasteinleitungskonzept

4.4.7.1 Problemstellung in der konventionellen Galley

Schwere Compartments oder Trolleys verursachen hohe, schlagartige Lasen auf die in den Rändern der Sandwichplatten installierten Verriegelungsknebel, siehe Abb. 150, links. Um die Verriegelungsknebel widerstandsfähig zu lagern, werden in den entsprechenden Stirnbereich der Sandwichplatten Aluminium-Vollprofile eingeklebt und zusammen mit den Deckschichten in einem Aluminium-U-Profil eingefasst (Alle Verklebungen werden mit dem Strukturklebstoff 3M Scotch Weld 9300 B/A FST vorgenommen). Nach der Klebstoffaushärtung werden die Knebel in Gewindebohrungen in den Vollprofilen eingeschraubt. Diese Bauweise zeigt jedoch neben einem hohen Gewicht eine mechanische ungünstige, sprunghafte Änderung der Steifigkeit.

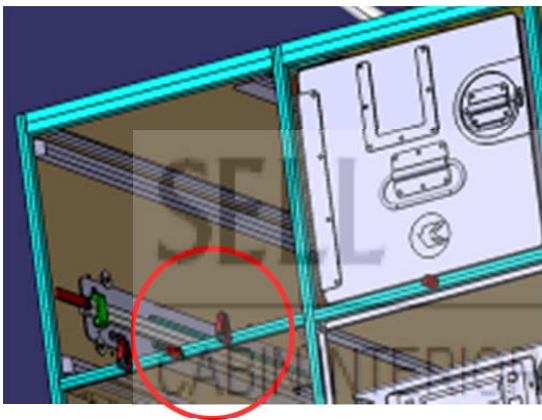


Abb. 215: Verriegelungsknebel in den Sandwichplattenstirnbereichen zur Fixierung von Containern und Kücheneinsätzen (45), (46).

4.4.7.2 Konzeptentwicklung

4.4.7.2.1 Alternativkonzept zum Hohlprofil-Nietkonzept

Im Projekt InGa wird der Ansatz verfolgt, die Aluminiumvollklötze mit Gewindebohrung durch CFK-Vierkanthohlprofile mit eingesetzten Nietmuttern zu ersetzen, siehe Abb. 151 sowie Abb. 153.



Abb. 216: Konventionelle Ausführung von stirnseitigen Lastenleitungspunkten in Sandwichpaneelen.



Abb. 217: Handknebel an einem mit einem U-Profil stirnseitig verstärkten Sandwichpaneel.



Abb. 218: CFK-Vierkanthohlprofil mit eingesetzten Nietmutter als gewichtsparendes Anschraubsystem für die Verriegelungsknebel im Sandwichstirnbereich.



Abb. 219: Arbeitsprinzip Nietmutter: Auffalzen eines Kragens beim Zusammenziehen der Nietmutter.

Im dünneren 10 mm SELL-Standardsandwichtyp 616 HC ist ein CFK-Vierkantprofil mit max. 8 mm Außenbreite montierbar. In diesen CFK-Profilen lassen sich jedoch keine Einnietmutter mit Innengewinden > 3 mm, wie sie für die Befestigung von Knebeln benötigt werden, installieren. Daher wird die Verwendung von Blind-Einnietschrauben, die beim Setzvorgang durch Materialverformung einen Hinterschnitt erzeugen, der sich hinter der Bohrung am CFK-Profil abstützt und so eine formschlüssige Verbindung bildet, vorgeschlagen. Durch die schmale Bauform der Nietgewindebolzen sind bis zu M5-Gewinde im 8 mm-CFK-Vierkanthohlprofil realisierbar, siehe Abb. 155.

Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung eines Gipsplattendübels, der durch das CFK-Vierkanthohlprofil hindurch geschraubt wird und sich an beiden Bohrungen im CFK-Profil sowie im Hartschaum abstützt. Da Gipsplattendübel jedoch nicht mit metrischem Innengewinde erhältlich sind, wird der erste Ansatz mit dem Blind-Einnietschrauben favorisiert, siehe Abb. 156.

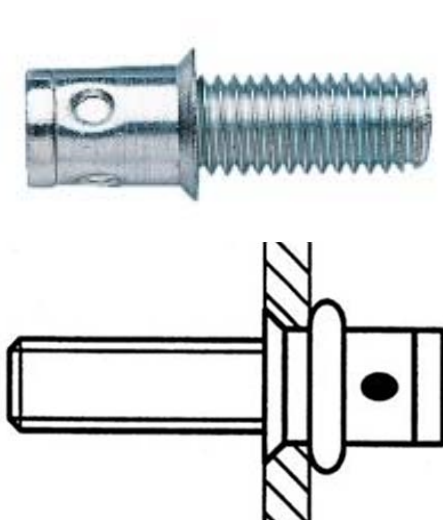


Abb. 220: Lösungsansatz 1: Blind-Einnietschrauben.

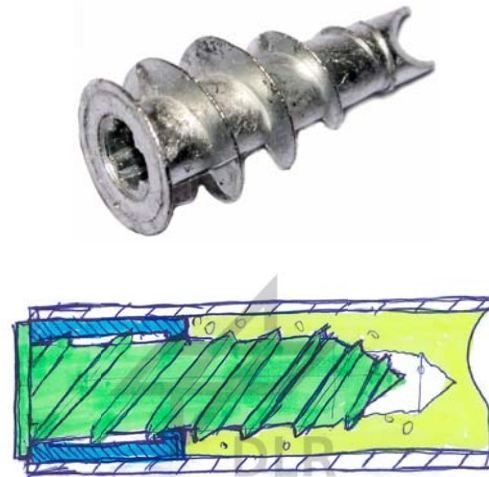


Abb. 221: Lösungsansatz 2: Zementhohldübel.

Von dem CFK-Hohlprofilkonzept wird sich eine deutliche Gewichtsersparnis bei vergleichbarer mechanischer Leistungsfähigkeit erhofft. Die stirnseitigen Lasteinleitungen können dabei ebenfalls zur Darstellung von Sandwich-Sandwich-T-Stößen oder zur Befestigung von Handknebeln dienen, siehe Abb. 42, Abb. 150 und Abb. 152.

Die Ergebnisse der Nietversuche in den CFK-Vierkanthohlprofilen fielen jedoch negativ aus. Die Profile rissen in Längsrichtung an den Nietlöchern ein. Dies lag an der fertigungsprozessbedingten Faserausrichtung in den Vierkanthohlprofilen, so können die Fasern beim Pultrusionsverfahren nur unidirektional entlang des Profils angeordnet werden. Da damit keine Fasern in Querrichtung verlaufen, bietet das Profil kaum Widerstand gegen Kräfte in diese Richtung. So trat bereits teilweise beim Bohren der Nietlöcher ein Versagen durch Rissbildung entlang der Fasern am Lochrand auf. Eine endgültige Aufspaltung war dann beim Anziehen der Niete zu beobachten, siehe Abb. 157.



Abb. 222: Schadensbilder im CFK-Vierkanthohlprofil: Risse entlang des Faserverlaufs durch Lochleibungskräfte beim Auffalzen des Nietkörpers.

Im Pull-Winding-Verfahren hergestellte FKV-Vierkanthohlprofile weisen den Vorteil auf, dass ein geringer Anteil der Fasern in 45°/135°-Richtung im Profil verläuft, siehe Abb. 158, Spezifikation siehe Tab. 21, 3. Spalte. Dennoch zeigen sich auch bei diesen die gleichen Schädigungsphänomene beim Vernieten: Die Profile werden durch die Druckkraft, die beim Aufwulsten der Niete auf die Lochleibung ausgeübt wird, gesprengt bzw. bildeten sich Längsrisse in der Matrix zwischen den Längsfasern, siehe Abb. 159.



Abb. 223: CFK-Vierkanthohlprofile, hergestellt im Pull-Winding-Verfahren. Auf der Oberfläche sind Faserrovingsbündel zu erkennen, die in 45°/135°-Richtung zur Profillängsrichtung verlaufen.



Abb. 224: Schadensbild an einem CFK- Pull-Winding-Vierkanthohlprofil durch Vernietung; Riss entlang der Hauptfaserrichtung des Profils.

Seit ca. 11.2014 sind bei der Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH gewickelte Vierkanthohlprofile mit der Bezeichnung „CFK-Quadratrohr gewickelt, 20 x 20 x 1 mm, 3K-Leinwandgewebe aus Kohlenstofffasern“ beziehbar, vgl. Abb. 160. Sie weisen einen deutlich

höheren Anteil an Fasern in Querrichtung auf und ertragen daher erwartungsgemäß sowohl den Bohr- als auch den Vernietungsprozess rissfrei, vgl. Abb. 161.



Abb. 225: CFK-Vierkanthohlprofile, hergestellt aus gewebten Faserhalbzeug der Fa. R&G GmbH.



Abb. 226: An mit einem handelsüblichen Metallbohrer gesetzten Bohrungen sind kein Einreißen oder Delaminationen erkennbar.

Nietversuchen zeigen jedoch, dass der ebene, vergleichsweise steife Nietkragen die leicht gekrümmten Profiloberflächen deutlich verformt, was im Nietlochrandbereich zu leichten Schädigungen in Form von Delaminationen und Verformungen führt.



Abb. 227: Setzen von Nietmuttern mit Hilfe einer Nietzange.

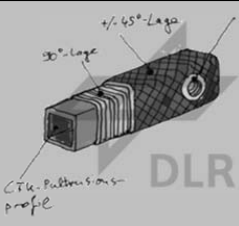
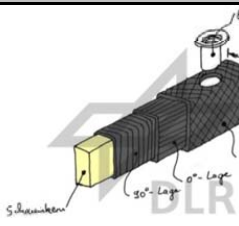
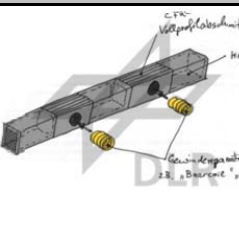


Abb. 228: Nietprobekörper zeigen nur leichte Delaminationen im Bereich der Nietbohrungen.

Von einem aus Gewebe gefertigten CFK-Vierkanthohlprofil mit ebenen Seitenflächen wird vermutet, dass sowohl Bohrungen als auch Vernietungen ohne Schädigungen möglich sind. Da jedoch keine Verfügbarkeit am Markt bekannt ist, wurde von dem Nietprofilkonzept abgewichen und ein Alternativkonzept mit Vollmaterial im Gewindebereich entwickelt. Ein zunächst vielversprechender Kontakt zur Fa. Schunk Kohlenstofftechnik GmbH ist nicht konstruktiv verlaufen. Daher wurde zu diesem Zeitpunkt auf ein geometrisch abweichendes Konzept, das sog. „GFK-Klötzchenkonzept“ zurückgegriffen.

4.4.7.2.2 Alternativkonzept zum Hohlprofil-Nietkonzept

Da mit der Verwendung von zurzeit auf dem Markt verfügbaren FKV-Hohlprofilen keine Lösung gesehen wird, wurden weitere Alternativkonzepte entworfen, die in der folgenden Tabelle vorgestellt werden.

Beschreibung Konzeptalternative	Skizze	Vorteile / Nachteile	Auswahl, Begründung
Verstärkung der vorhandenen, pultrudierten CFK-Vierkanthohlprofile mit CF-UD- oder Gewebematerial in 90°- und 45°-Richtung, um den Lochleibungskräften beim Vernieten in jeder Richtung durch Fasern aufnehmen zu können.		Zweifelhafte Qualität der Anbindung der zusätzlichen Lagen an das pultrudierte Profil, die präzisen Außenabmaße anforderungen müssen aufwendig in einem konkav geformten Formwerkzeug gefertigt werden.	Nicht ausgewählt: Aufbau und Fertigung zu komplex, um in gegebenem Zeitraum qualitativ und quantitativ hinreichende Profile zu fertigen.
Profil im Eigenbau durch Umwickeln eines Hartschaumkerns mit CF-UD-Material in unterschiedliche Richtungen, so dass die Nietkräfte durch das resultierende, quasiisotrope Materialverhalten ertragen werden.		Verlässliche, quasiisotrope Eigenschaften, jedoch komplexe Fertigung, da zur Erreichung von homogenen, genauen Außenabmaßen in einem konkav geformten Formwerkzeug gefertigt werden muss.	Nicht ausgewählt: Aufbau und Fertigung zu komplex, um in gegebenem Zeitraum qualitativ und quantitativ hinreichende Profile zu fertigen.
Eigenbauprofil der Fa. Schunk: Sonderanfertigung von Vierkanthohlprofilhalbzeug mit hinreichenden Eigenschaften.	[Noch keine Skizze vorhanden, da das Konzept noch nicht weiterverfolgt wurde]	[Konzept noch nicht vorhanden]	Nicht ausgewählt: [z. Z. keine, da Konzept noch nicht vorhanden].
Nutzung von partiellen Voll-GFK-Körpern an den Lasteinleitungsstellen, die sich durch geschickte Formgebung an beidseitig angeordneten CFK-Vierkanthohlprofilen abstützen.		Einfach und schnell herzustellen, Gewichtsvorteil gegenüber dem konventionellen Aluminiumklotz-konzept ist jedoch als gering einzuschätzen, technologisch geringer Fortschritt.	Ausgewählt: Fertigung und Montage hinreichend einfach, Vorbild vorhanden (FKV-Rennwagenmono-coques, Verbindungen zum lasttragenden Motorblock durch Verschraubungen in FKV-Vollklötze mit Gewindeeinsätzen).

Tab. 25: Alternativkonzepte zum Einnietmutter-FK-Vierkanthohlprofilkonzept.

4.4.7.3 Festlegung der zu testenden Randlasteinleitungskonzepte

Bei Rennwagen mit einem Chassis in Monoposti-Form (Rennwagenklassen mit freistehenden Rädern, z. B. Formel 1) wird das aus CFK gefertigte Monocoque mit der lasttragenden Motorblock-Getriebeeinheit mit mehreren Schrauben verbunden (47). Dazu sind im Monocoque massive FKV-Elemente einlamiert, in denen sich zentral eine Gewindebohrung mit einem Gewindeverstärkungselement befindet, siehe Abb. 164 bzw. Abb. 165.

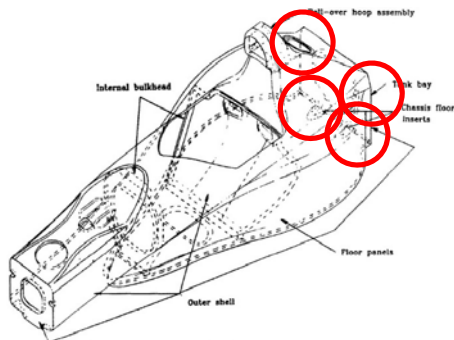


Abb. 229: CFK-Monocoque eines Rennwagens, Positionen der Anschraubpunkte rot umkreist, (48).

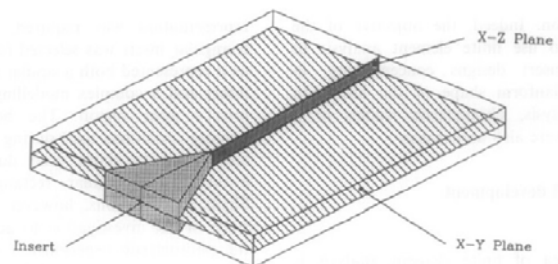


Abb. 230: FE-Modell eines FKV-Massivkörpers als Lasteinleitungspunkt, (48).

Diese Verbindungsgestaltung dient als Vorbild für das ausgewählte, stirnseitige Randlasteinleitungskonzept „GFK-Trapezkörper“ für Sandwichbauteile. An den Positionen der Anschraubpunkte werden trapezförmige Elemente aus massivem GFK mit eingesetzten Gewindebuchsen eingebracht. Zwischen diesen werden CFK-Vierkanthohlprofile eingesetzt. Die GFK-Trapezkörper haben eine Dichte von ca. $1,7 \text{ kg/dm}^3$ und bieten damit bereits bei gleicher Geometrie wie die der konventionellen Aluminium-Vollprofilbauweise (vgl. Abb. 151, Seite 150) eine Gewichtsreduzierung um $((1,7 / 2,7) / 100) = 37 \%$.

Die Trapezform der GFK-Massivkörper kann durch Abstützen an den CFK-Vierkanthohlprofilen dazu beitragen, dass unter Pull-Out- oder Shearbelastung die mechanische Leistungsfähigkeit weiter erhöht wird. Die Formgebung fällt dabei aber nicht zu komplex aus, um eine einfache Fertigung zu gewährleisten. So sind die winkligen, jedoch gerade Zuschnitte mit Hilfe einer einfachen Tischkreissäge möglich.

Als Kompromiss aus diesen Anforderungen wurde als erste Iterationsstufe die auf den Abb. 166 und Abb. 167 dargestellte Geometrie des GFK-Massivkörpers sowohl für die Sandwichtypen 618 HC und 616 HC entwickelt.

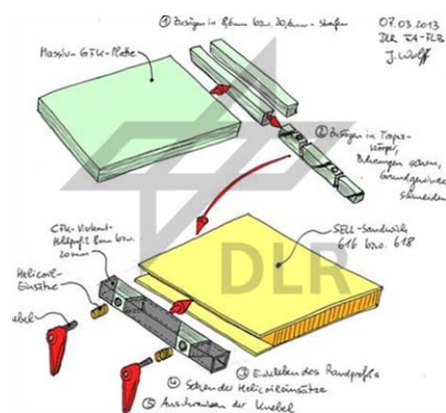


Abb. 231: Skizze des Fertigungs- und Fügeablaufs des Randanbindungskonzepts.

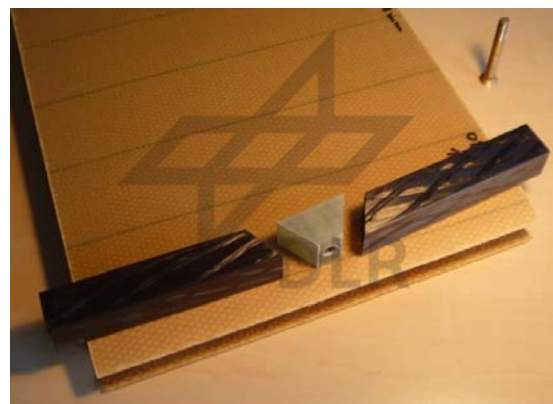


Abb. 232: Prototyp des GFK-Trapezkörperkonzepts inkl. Mittenbohrung mit Gewindeverstärkungseinsatz zur Aufnahme der Anschlusschraube.

Zunächst wurden die Höhen der GFK-Trapezkörper rechnerisch mit Hilfe der Angaben der Fa. SELL GmbH zu den Kernhöhen der Sandwichpaneeltypen 616 HC und 618 HC sowie der Angaben des Klebstoffherstellers zur idealen Klebstoffschichtstärke bestimmt. So ist nach Datenblatt der Klebstoff 9300 B/A FST mit einer Schichtstärke von 0,09 mm – 0,15 mm (90 - 150 µm) zu verkleben. Damit ist die maximale Höhe der GFK-Trapezkörpers im entsprechenden Sandwichtyp die Differenz aus der Kernhöhe und der Klebstoffstärken oben und unten:

1. Sandwichtyp 616 HC:

$$9,4\text{mm} - (2 \cdot 0,15\text{mm}) = 9,1\text{mm} \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

2. Sandwichtyp 618 HC:

$$21,4\text{mm} - (2 \cdot 0,15\text{mm}) = 21,1\text{mm} \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

Die CFK-Vierkanthohlprofile sind nur in Vorzugsmaßen im Handel erhältlich, sodass auf Profile mit Höhen von 8 mm (616 HC) und 20 mm (618 HC) zurückgegriffen werden muss, vgl. Tab. 21.

Spezifikation CFK-Vierkanthohlprofile		
Beschreibung	CFK-Vierkanthohlprofil für Sandwichtyp 616 HC	CFK-Vierkanthohlprofil für Sandwichtyp 618 HC
Bezeichnung	DPP™ CFK-Quadratrohr	CFK-Rohr vierkant
Bezug	R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH	CTG Carbon Team Germany GmbH
Halbzeugabmaße	Außen: 8 x 8 mm, Innen: 6,2 x 6,2 mm, Länge: 1000 mm	Außen: 20 x 20 mm, Innen: 18 x 18 mm, Länge: 1000 mm
Herstellungsweise	Pultrusion	Pull-Winding
Material	CF, Epoxidharz	CF, k. A.
Artikelnummer	6308061	RP102020

Tab. 26: Spezifikation der CFK-Vierkanthohlprofile.

Bei den ersten Anpassungsversuchen zeigte sich jedoch dass, entgegen der zuvor beschriebenen Berechnung, der Zwischenraum zwischen den Deckschichten deutlich kleiner ist. Dies liegt daran, dass eine präzise Befräsung der Innenseiten der Deckschichten aufgrund der Verformungen der losen Deckschichten nicht möglich ist, so dass nach der Bearbeitung Reste der Kernwaben auf den Deckschichten stehen bleiben, siehe Abb. 169.

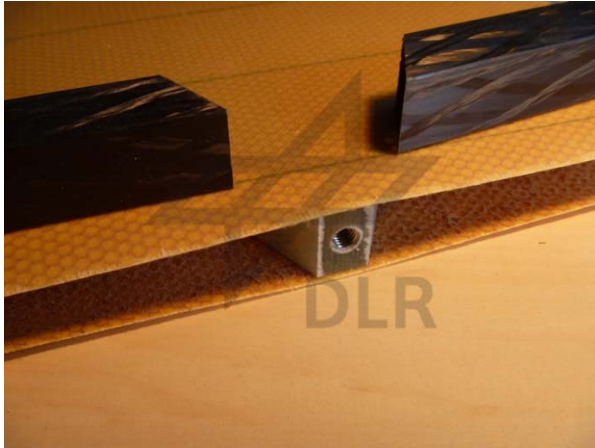


Abb. 233: GFK-Trapezkörper mit einer theoretisch als optimal errechneten Höhe drückt die Deckschichten stark auseinander.

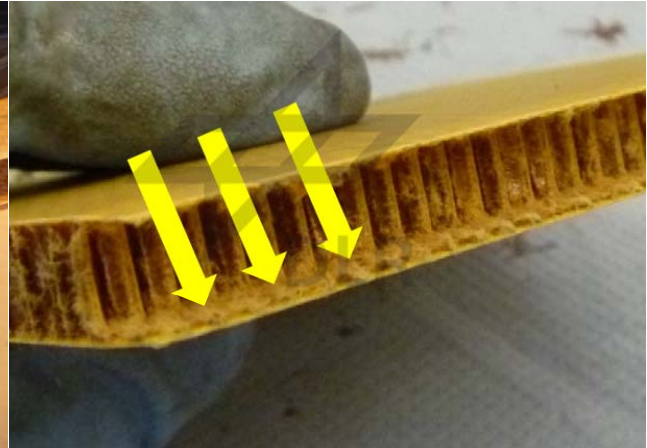


Abb. 234: Nach Ausfräsen der Kernschicht auf den Deckschichtoberflächen innen verbleibende Kernwabenreste.

Die notwendige Anpassung der Höhen der GFK-Trapezkörper erfolgte durch Ausprobieren. Die nun gewählten Höhen von 8 mm für den Sandwichtyp 616 HC sowie 20 mm für den Sandwichtyp 618 HC bringen den Vorteil mit sich, dass der Höhenunterschied zwischen den GFK-Trapezkörpern und den CFK-Vierkanthohlprofilen ausgeglichen wurde, vgl. Abb. 170. Durch die ungenauen inneren Deckschichtoberflächen erhöht sich ebenfalls die Klebstoffstärke, um Höhentoleranzen auszugleichen.



Abb. 235: In der Materialstärke auf 20 mm reduzierter GFK-Trapezkörper in der Randtasche des Sandwichtyps 618 HC

4.4.7.4 Randinsert-Sandwichprobekörper

4.4.7.4.1 Dimensionierung

In der Vergangenheit wurden bei der Fa. SELL GmbH weder Pull-Out- noch Sheartests an den konventionellen Aluminium-Vollprofilrandanbindungen vorgenommen. Festigkeitsnachweise der Vollrandprofilanbindung wurden nur mit Hilfe von Knebeltests durchgeführt. Ggf. sollten zur besseren Vergleichbarkeit zukünftig Referenztests mit Pull-Out- und Shearbelastungen

nachgeholt werden. daraus resultiert, dass es keine Orientierungsgrundlagen für die geometrische Auslegung der Insert-Sandwichprobekörper gibt.

Probekörper für transversale Belastung

Für die Dimensionierung der Pull-Out-Testsandwichpaneele für das Randlasteinleitungskonzept konnten keine mechanisch begründeten Empfehlungen o. ä. gefunden werden. Die Größe der Pull-Out-Insert-Sandwichprobekörper nach (38), Seiten 9.1 und 9.1.1 ist zu groß, da diese für vergleichsweise große Randlasteinleitungskörper vorgesehen sind.

Daher erfolgte eine Festlegung der Breite der Sandwichtestkörper beim Sandwichtyp 616 HC auf 125 mm, beim Sandwichtyp 618 HC auf 225 mm ohne mechanische Begründung.

Die Länge der Pull-Out-Sandwichprobekörper richtete sich nach der Doublerbreite, hier wurde 5 x Doublerbreite angesetzt. Die Doublerbreite selber entspricht der doppelten Höhe der Elemente des Randlasteinleitungskonzepts, also für den Sandwichtyp 618 HC 40 mm, für den Sandwichtyp 616 HC 16 mm. Damit ergeben sich für die Pull-Out-Sandwichprobekörper die in den folgenden Abbildungen dargestellten Maße.

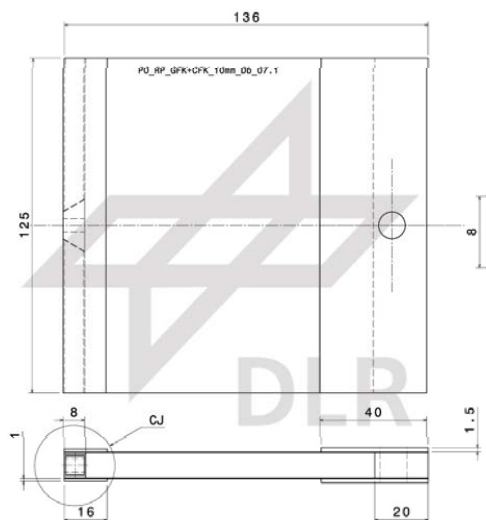


Abb. 236: Sandwichtestprobekörper mit Randlasteinleitung zur Prüfung von Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 616 HC unter flächenparalleler Zugbelastung.

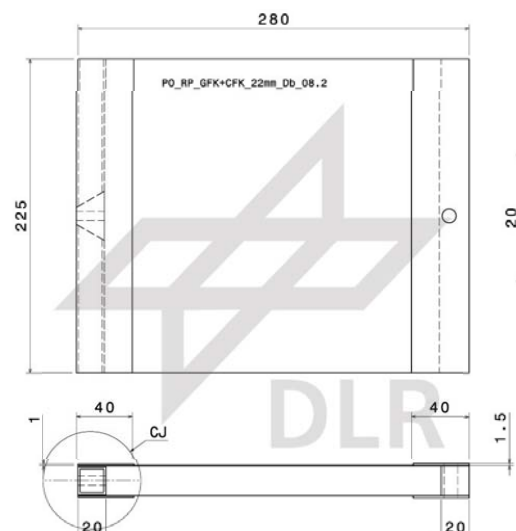


Abb. 237: Sandwichtestprobekörper zur Prüfung von Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 618 HC unter flächenparalleler Zugbelastung.

Die Testsandwichpaneele wurden beim DLR FA FLB auskonstruiert und die CAD-Daten sowie die Fertigungszeichnungen an die Fa. SELL GmbH zur Fertigung der Testsandwichpaneele übergeben, siehe Abb. 173 und Abb. 178.

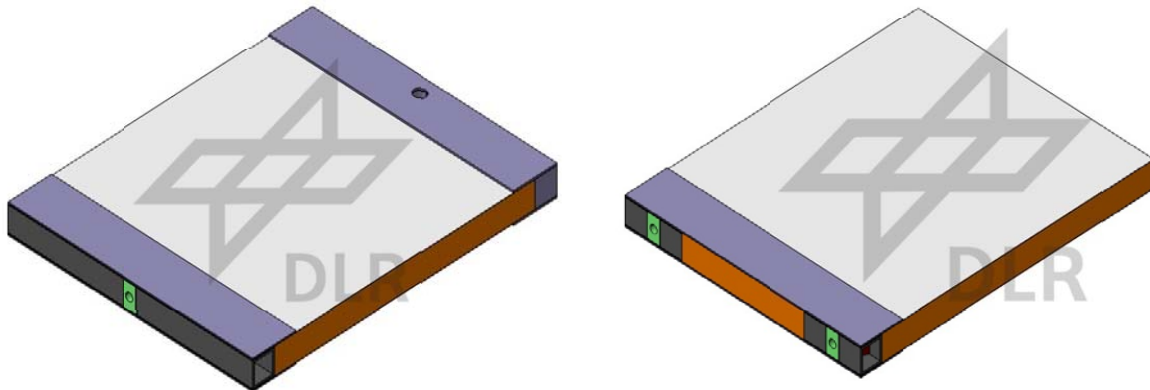


Abb. 238: CAD-Modelle der Sandwichprobekörper für die Untersuchung des „GFK-Klötzchen“-Randlasteinleitungskonzepts unter flächenparalleler Zug- sowie Schubbelastungen.

Probekörper für flächenparallele Belastung

Weder für die Länge der Lasteinleitungselemente selber (GFK-Trapezkörper und CFK-Vierkanthohlprofile) noch für die Länge des Paneels selbst konnten Empfehlungen oder Vorgaben für Shear-Sandwichproben gefunden werden. Daher wurden die Dimensionen, allerdings unter Berücksichtigung des in Abschnitt 2.5.2 erläuterten Störungseinflussradius bestimmt. Die resultierenden Maße für die Shear-Sandwichprobekörper sind in auf den folgenden Abb. 174 und Abb. 175 dargestellt.

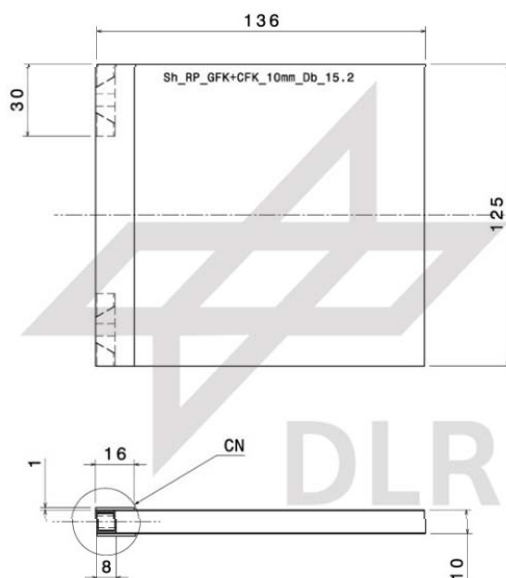


Abb. 239: Sandwichprobekörper mit Randlasteinleitung zur Prüfung von Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 616 HC unter flächenparalleler Schubbelastung.

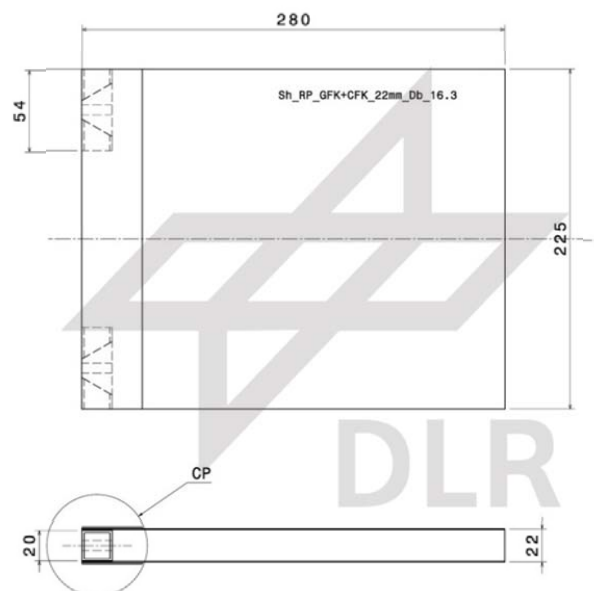


Abb. 240: Sandwichprobekörper mit Randlasteinleitung zur Prüfung von Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 618 HC unter flächenparalleler Schubbelastung.

Probekörper für Knebelproben

Die Dimensionen der Insert-Sandwichprobekörper für die Knebeltests richten sich direkt nach der Geometrie der vorhandenen Testeinrichtung der Fa. SELL GmbH, die für die Tests genutzt werden soll, siehe auch Abb. 176. So wird auch eine maximale Vergleichbarkeit zu den Knebeltests, die im Rahmen der 1993er SELL-Tests vorgenommen wurden sichergestellt, vgl. (37).

Die ausgewählten Knebel werden bei der Fa. SELL GmbH eingesetzt, um Standardunits in den Fächern der Galley zu halten.

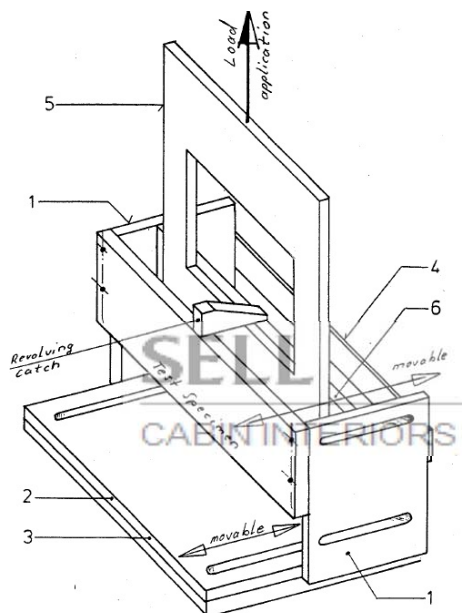


Abb. 241: Abmaße der Versuchsanordnung für Knebeltests an Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 618 HC, (39), Seite 9.1.

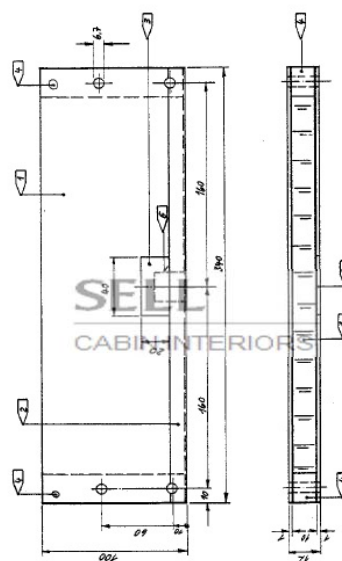


Abb. 242: Abmaße der Probenkörper für Knebeltests an Randlasteinleitungskonzepten im Sandwichtyp 618 HC, Vorgabe durch Fa. SELL GmbH, (37), Seite 9.4.

Für die Knebeltests wurden CAD-Modelle der Testsandwichpaneele erstellt und an die Fa. SELL GmbH übergeben, siehe Abb. 178.

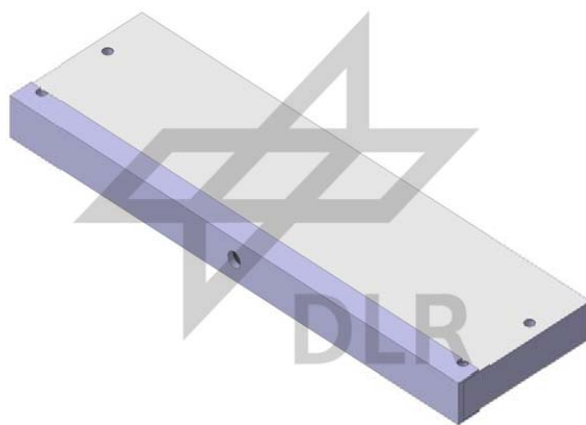


Abb. 243: CAD-Modell eines Knebeltest-Sandwichprobekörpers mit integriertem „GFK-Klötzchen“.

4.4.7.4.2 Fertigung

4.4.7.4.2.1 Fertigung der Einzelteile

Fertigungsbeschreibung GFK-Vollmaterialplatte

Folgend wird die Fertigung der monolithischen Glasfaserkunststoffplatte beschrieben, die als Halbzeug für die GFK-Trapezkörper für das Randanbindungskonzept diente, vgl. Abb. 166, Seite 155. Die Dimensionen der Platte betragen 600 x 400 x 20,5 mm.

Aufbau Trockengelege

Als Fasermaterial wurde Glasfaser-Quadrax-Gelege mit der Bezeichnung *Saertex S35EQ260* verwendet, vgl. Tab. 22. Es wurden insgesamt 34 Lagen des Quadraxgeleges in der Größe 600 x 400 mm zugeschnitten und für den Lagenaufbau verwendet.

Spezifikation Faserhalbzeug	
Bezeichnung	S32EQ260, quadraxial glass fabric
Bezug	Fa. Saertex GmbH & Co. KG
Faserart	Glasfaser
Material	E-Glas
Bindung	Gelege, quadrax
Trockenflächengewicht	822 g/m ²
Anzahl Unidirektionallagen	4
Faserausrichtungen	0°/45°/90°/135°
Laminatdichte*	1,83 g/m ²
Lagenstärke insg.*	0,64 mm

Tab. 27: Spezifikation des für die GFK-Trapezkörper verwendeten Faserhalbzeugs

*) = Theoretisch berechneter Wert für 50 % Faservolumengehalt [6]

Aufbau der Faserpreform

Für den Aufbau des Fasermaterials wurden 34 Quadraxgelegelagen übereinander in gleicher Ausrichtung gestapelt, siehe Abb. 179. Das Gelege wurde anschließend ganzflächig mit Abreißgewebe und Fließhilfsgewebe abgedeckt.

Vakuumaufbau für Injektion im VARI-Verfahren

Auf diesen Aufbau wurde mittig in Längsrichtung ein Linienanguss in Form eines Omega-Silikonprofils mit innenliegender Stahlspirale platziert. Jeweils seitlich der Platte wurden Glasfaservließstreifen abgelegt und an der hinteren Längsseite zusammengeführt, siehe Abb. 180. Das Glasfaservließ dient als Kavität.

Über den Aufbau wurden zwei Vakuumfolien inkl. zweier Absaugungen gelegt und so gesiegelt, dass sie getrennt evakuiert werden können. Die erste Vakuumfolie dient als Abschluss zur Atmosphäre, um durch Evakuieren einen Druckunterschied erzeugen zu können. Dieser dient zur Kompaktierung des Lagenaufbaus, womit ein hoher Faservolumengehalt erreicht wird.

Die zweite Folie dient als Sicherheit, falls sich in der ersten Folie ein Loch bilden sollte. So wird bestmöglich ein ungewollter Harzaustritt verhindert, darüber hinaus kann die zweite Folie die Aufgaben der ersten Folie übernehmen, so dass im Fall eines Schadens in der ersten Folie trotzdem ein Bauteil mit akzeptablen Eigenschaften erzeugt werden kann.

Bei beiden Folien wurde darauf geachtet, dass auftretende Falten an die Plattenkanten gelegt wurden, sodass beim Injizieren durch eine nicht dicht an den Bauteilstirnseiten anliegende Vakuumfolie keine unerwünschten, die Harzverteilung negativ beeinflussende Harzkanäle entstanden.



Abb. 244: Zugeschnittene Glasfaser-Quadraxlagen zu einem Trockenfaserlagenpaket gelegt.



Abb. 245: Infusionsaufbau vor dem Auflegen der Vakuumfolien.

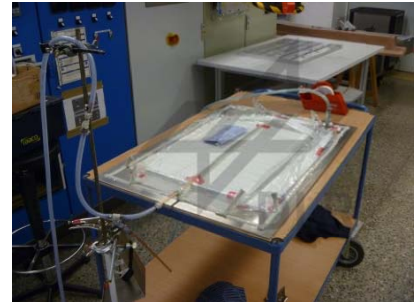


Abb. 246: Evakuierter Infusionsaufbau, fertig zur Injektion des Harzsystems.

Matrixinjektion und Aushärtung

Der Aufbau wurde mit einem zweikomponentigen Epoxid-Harzsystem des Herstellers Fa. Sicomin Epoxy Systems injiziert, das aus dem Harz *SR 1710 Injection* und dem Härter *SD 8822* besteht, vgl. Tab. 23 sowie Tab. 24.

Die Topfzeit des Harzsystems beträgt je nach Raumtemperatur zwischen 10 h bei 20 °C und 3 h 50 min bei 25 °C. Abgemischt wurden insgesamt 4,6 kg des Harzsystems mit einem Mischungsverhältnis von 100:35, dies entspricht 3407 g Harz und 1193 g Härter. Direkt nach dem Vermischen wurde das Harzsystem durch Evakuierung entgast. Dabei stieg eine Schaumsäule von austretenden Lufteinschlüssen 5 – 10 cm hoch in den Behältnissen auf, welche einen guten Indikator für ein nahezu gasfreies Harzsystem ist.

Spezifikation Harzsystem	
Harzart	2K-Epoxydharzsystem
Bezeichnung Harz	SR 1700i (Injection)
Bezeichnung Härter	SD 8822
Bezug	Time Out Composite oHG
Mischungs-verhältnis (nach Gewicht)	100 x Harz : 37 x Härter
Beschreibung Harzsystem	2-komponentiges Epoxidsystem, speziell für „Resin Transfer Moulding“-Prozesse entwickelt. Das System weist eine sehr geringe Viskosität auf und besitzt zur Produktion großer Bauteile einen Härter mit sehr geringer Reaktivität. Wahrung der mechanischen Eigenschaften in nasser Umgebung. Temperaturbeständigkeit: T _{g1} max = 100 °C.
Topfzeit	11 h bei 20 °C, 5 h bei 25 °C
Gemischte Dichte	1,086 g/cm ³
Aushärtung	24 h bei Raumtemperatur, danach Temperung für 16 h bei 60 °C oder für 20 h bei 50 °C
Glasübergangs-temperatur T_{g1}	87 °C

Tab. 28: Spezifikation der Matrix der Fa. Sicomin Epoxy Systems, Harz SR 1700i und Härter SD 8822, (49).

Die Injektion wurde im VARI-Verfahren durchgeführt und dauerte 30 min. Abb. 182 zeigt die linienförmige Harzfront auf beiden Seiten des Angusses. Zeitgleich mit dem Harztopf wurde auch die zweite Absaugung vom Aufbau getrennt. Der Aufbau nahm ca. 3430 g des Harzsystems auf.

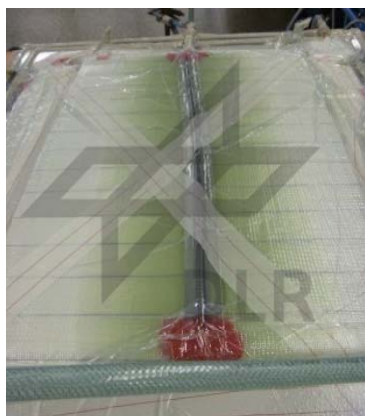


Abb. 247: Injektionsvorgang des flüssigen Harzsystems.



Abb. 248: Mit Harzmatrix durchtränktes Lagenpaket.

Trotz der massiven Bauweise der Platte, die ein ungünstiges, geringes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen hat, kam es nicht zu einer zu starken Erwärmung bzw. nicht zu einer exothermen Aushärtereaktion des Harzsystems im Bauteil. Damit bestätigte sich die Wahl des geringreaktiveren Härters SD 8822 als richtig. Nach Abschluss der Injektion härtete die GFK-Platte für 3 Tage bei Raumtemperatur aus, wobei der Vakuumaufbau nicht entfernt wurde. Abschließend wurde die Platte entformt sowie bei 60°C für 16 h gemäß Datenblatt getempert, siehe Abb. 184 und Abb. 185.

Mechanische Eigenschaften Harzsystem (Nach 60 °C-Temperzyklus)		
	<i>Zugbelastung</i>	<i>Biegung / Flexibilität</i>
Zugfestigkeit / Biegefestigkeit	85 N/mm ²	136 N/mm ²
E-Modul	3680 N/mm ²	3720 N/mm ²
Bruchspannung	85 N/mm ²	k. A.
Max. Dehnung	3,1 %	5,2 %
Bruchdehnung	3,1 %	7,3 %

Tab. 29: Mechanische Eigenschaften der Matrix der Fa. Sicomin Epoxy Systems, Harz SR 1700i und Härter SD 8822, (49).

Die Endkontrolle zeigte dass das Fasermaterial vollständig durchtränkt wurde, es waren keine Fehlstellen (Poren, harzarme Bereiche etc.) festzustellen. Jedoch fielen zwei Fertigungsungenauigkeiten auf. So war die Plattenoberseite zu den Kanten hin leicht konvex gewölbt (in der Mitte am dicksten), weiterhin hinterließ der Linienanguss entlang der Oberseite einen Abdruck in der GFK-Massivplatte. Beides hätte durch die Verwendung eines Abdeckbleches mit Durchgangslöchern im Bereich des Angusses vermieden werden können. Diese Formungenauigkeiten haben jedoch keinen Einfluss auf die Geometrie oder Qualität der anschließend aus der GFK-Massivplatte gefertigten GFK-Trapezkörper zur Randlasteinleitung und wurden daher akzeptiert.



Abb. 249: Entformung nach der Aushärtung bei Raumtemperatur.



Abb. 250: Tempern der GFK-Massivplatte bei 60°C für 16 h.



Abb. 251: Endkontrolle: Qualitäts- und Massenermittlung.

Zuschnitt und Bohren der GFK-Trapezkörper

Aus der GFK-Massivplatte wurden mit Hilfe einer wassergekühlten, zahnlosen, diamantbesetzten Kreissäge Streifen der Breiten 8 und 20 mm geschnitten, siehe Abb. 187.

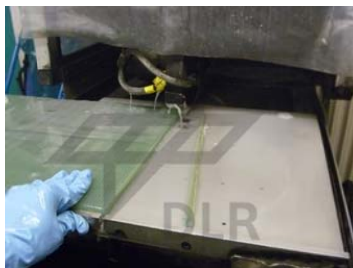


Abb. 252: Streifen zu 8 und 20 mm als Halbzeug für die Voll-GFK-Trapezkörper des Randprofilkonzepts.



Abb. 253: Führungsschablone zum winkligen, maßhaltigen Zusägen der Voll-GFK-Trapezkörper.

Der winklige Zuschnitt zur endgültigen Trapezform der GFK-Streifen erfolgte in einem Fachbetrieb mit Hilfe von Schablonenführungen, siehe Abb. 188. Anschließend wurden in die kurzen Stirnseiten zentral Bohrungen eingebracht.

Zuschnitt der CFK-Vierkanthohlprofile

Die Formatierung der CFK-Vierkanthohlprofile erfolgte ebenfalls in einem Fachbetrieb. Das maßhaltige Zusägen gestaltete sich besonders bei den 8 mm-Vierkanthohlprofilen als schwierig, da zum einen die Abmaße sehr gering sind (beim 616 HC Sandwichtyp für die Sheartests unter 10 mm Länge) und zum anderen die pultrudierten Profile bereits bei leichten Schlägen durch die Sägeblattzähne Längsrisse bekamen. Hier halfen sowohl ein eingestecktes Holzprofil zur Stützung der Profile von innen als auch eine äußere Führung in einer U-Nut in einem Holzprofil, siehe Abb. 189.

Laut des Fachbetriebs zeigten die 8 mm- CFK-Vierkanthohlprofile eine unterschiedlich starke Rissneigung beim Zusägen pro Halbzeug (also pro Profilstab). Dies lässt eventuell auf unterschiedliche (Fertigungs-)Qualitäten bzw. unterschiedliche Faservolumengehalte der Einzelhalbzeuge schließen.



Abb. 254: CFK-Vierkanthohlprofile, eingelegt in Holzstützschablonen mit U-Nut als für das Zusägen



Abb. 255: Winklig zugesägte CFK-Vierkanthohlprofile 8 mm für die Verwendung im Sandwichtyp 616 HC

Auswahl der Gewindeeinsätze

Gewindeeinsätze werden zur Verstärkung und Lastverteilung besonders bei hochbelasteten Verschraubungen in Aluminium eingesetzt. Da erwartet wird, dass sich die Vorteile von Gewindeeinsätzen auch in massiven GFK-Elementen ausnutzen lassen, wurden diese ebenfalls in die GFK-Trapezkörpern eingesetzt. Eine Kurzübersicht über die wichtigsten Gewindeeinsatzsysteme, die am Markt verfügbar sind, bietet die folgende Tab. 25.

Hersteller	Vertreiber	Bezeichnung	In zölligen Größen lieferbar?
K. A.	Würth	TimeSert	k. A.
Böllhoff Verbindungstechnik GmbH & Co. KG	(U. a.): Maschinenhandel Sued	HeliCoil	ja
BAER Vertriebs GmbH	BAER Vertriebs GmbH	BaerCoil	ja
K. A.	k. A.	Optisert	k. A.
K. A.	k. A.	BigSert	k. A.
K. A.	k. A.	Orsy 100	nein
Völkel	Schrauben Wegertseder	Ensat, selbstschneidend	nein
K. A.	Schrauben Wegertseder	Amecoil	nein
KerbKonus	Tola-Tools	GRIPP	nein

Tab. 30: Übersicht über am Markt erhältliche Gewindeverstärkungen

Aus diesen Gewindeverstärkungssystemen wurden aus folgenden Gründen das HeliCoil- sowie das BaerCoil-System der Firmen Böllhoff Verbindungstechnik GmbH & Co. KG bzw. BAER Vertriebs GmbH ausgewählt:

- Beide Systeme sind in Europa auch in zölligen Größen verfügbar, dies auch in den geforderten Feingewindestärken 10-32 UNF und ¼"-28 UNF, die für die Knebelbefestigung benötigt werden.

- Beide Systeme sind seit Jahren für die Reparatur und die Verstärkung von hochbelasteten Gewinden Standard in der Industrie.
- Beiden Systeme sind drahtförmige Gewindeeinsätze, die im Vergleich zu buchsenförmigen Einsätzen ein wesentlich geringeres Gewicht aufweisen.
- Beide Systeme lassen sich einfach verarbeiten: Grundloch bohren, Gewinde schneiden, Gewindeeinsatz einsetzen, Schlusszapfen brechen.
- Die Systeme sind in unterschiedlichen Längen erhältlich, eine möglichst lange Einschraubtiefe ist von Vorteil, da die eingeleitete Last damit homogener in den GFK-Trapezkörpern verteilt wird.



Abb. 256: Reparatursatz der Fa. Böllhoff, Gewindeeinsatzsystem HeliCoil.



Abb. 257: Reparatursatz der Fa. BAER Vertriebs GmbH, Gewindeeinsatzsystem BaerCoil.

Da die HeliCoil-Gewindeeinsätze im HJ 2014/1 in der zölligen Gewindegröße $\frac{1}{4}$ "-28 UNF in Deutschland vergriffen waren, wurde auf die Gewindeeinsätze der Fa. BAER Vertriebs GmbH zurückgegriffen. Diese sind von der Formgebung nahezu identisch mit den HeliCoil-Gewindeeinsätzen.

Installation der Gewindeeinsätze

Im Folgenden werden die Bearbeitungsschritte zum Einbringen der Gewindeverstärkungssysteme in die GFK-Trapezkörper bildlich dargestellt.

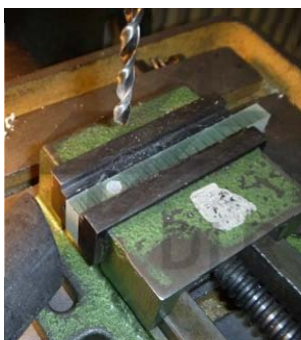


Abb. 258: Bohren des Grundlochs.



Abb. 259: Gewindeschneiden mit den mitgelieferten Spezialgewindeschneidern.



Abb. 260: Einschrauben des Gewindeeinsatzes.

Obwohl die beiden Gewindeverstärkungssysteme in ihren Formgebungen und Dimensionen nahezu identisch sind, ließen sich die BaerCoil- im Gegensatz zu den HeliCoil-Einsätzen schwerer in die Gewindebohrungen im GFK eindrehen. Vermutet wird das beim BaerCoil-Einsatz die „Gewindeeinsatzfeder“ eine geringere Steigung als das Grundgewinde aufweist und

beim Eindrehen dadurch etwas gestreckt wird. Dies trägt zum festen Sitz des Gewindeeinsatzes in der Gewindebohrung bei und wird daher akzeptiert.

Eine weitere Beobachtung war, dass sich die Schraube beim ersten Eindrehen in den HeliCoil-Einsatz sehr einfach, im BaerCoil-Einsatz jedoch nur mit Kraftaufwand eindrehen ließ. Auch dies wird akzeptiert, da beim BaerCoil-Einsatz so eine zusätzliche Sicherung der Schraube gegen ungewolltes Lösen resultiert.

Reinigung und Vorprüfung der Sandwichpaneele

Die Sandwichrohpaneele zum Aufbau der Probekörper für die innovativen Inserts wurden dem DLR FA FLB in der Endgeometrie inkl. Bohrlöchern der richtigen Geometrie von der Fa. SELL GmbH zur Verfügung gestellt.

Die Sandwichrohpaneele wurden auf Transportschäden hin überprüft.

Die anschließende Reinigung der Sandwichpaneele erfolgte durch Absaugen des Sägestaubs und Abwischen der zu verklebenden Bereiche mit Aceton getränkten, fusselfreien Papiertüchern. Bei der Fa. SELL GmbH wird statt Aceton das Produkt „Metaclean“ zur Vorbehandlung eingesetzt, nach Absprache mit der Fertigung der Fa. SELL GmbH sind die Reinigungswirkungen jedoch vergleichbar und haben somit auf die Versuchsergebnisse keinen relevanten Einfluss.

4.4.7.4.2.2 Fertigung der Probekörper

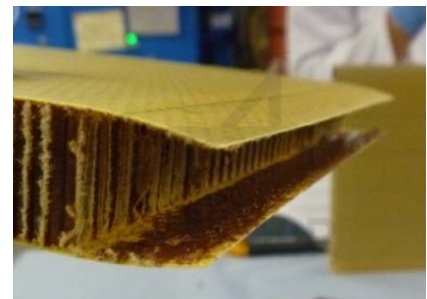
Der Zusammenbau der Insert-Sandwichtestkörper für das Randanbindungskonzept (GFK-Klötzchenkonzept, vgl. Abschnitt 2.4.7.3, ab Seite 155) für die Pull-Out- und Sheartests erfolgte analog zu den Arbeitsschritten der Topf- und Schraubinserts, vgl. Abschnitt 2.4.3.5.2 ab Seite 97. Daher wird hier nur ein kurzer Überblick in Form einer Bildfolge gegeben.



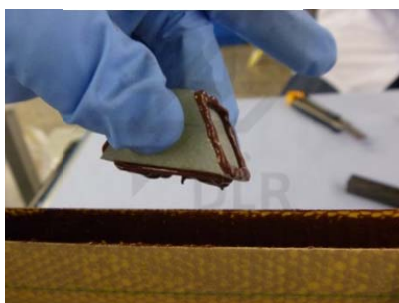
1. Auswiegen der Einzelteile der Randanbindungskonzepte.



2. Einzelteile des Randanbindungskonzepts hier am Bsp. eines Pull-Out-Testkörpers.



3. Auftragen des Klebstoffs auf den Innenseiten der Deckschichten, aufgetragen und ausgestrichen.



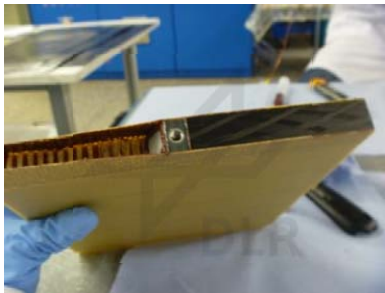
4. Mit Klebstoff versehenes GFK-Klötzchen.



5. GFK-Klötzchen in der Sandwichstirntasche positioniert.



6. CFK-Vierkanthohlprofil, Klebstoff aufgetragen und ausgestrichen.



7. CFK-Vierkantprofil in der Sandwichstirntasche positioniert.



8. Klebstoff auf Doubler-blech aufgetragen.



9. Fixierung und Anpressung der Doubler auf den Außenseiten der Deckschichten.

Abb. 261: Zusammenbau der Insert-Sandwichprobekörper für Pull-Out-, Shear- und Knebeltests des aktuellen Randanbindungskonzepts (GFK-Klötzchen und CFK-Vierkanthohlprofile)

Zusätzlich zu den im Abschnitt 2.4.7.4.2.2 dargestellten Arbeitsschritten mussten bei den Randprofilkonzepten noch die Stirnseiten verschliffen werden. Um eine flächige Anbindung des Voll-GFK-Trapezkörpers sowie der CFK-Vierkanthohlprofile an den Wabenkern zu gewährleisten, wurde rückseitig mit viel Klebstoff gearbeitet. Dieser drang jedoch auch in die Durchgangsbohrung der GFK-Trapezkörper ein und setzte die Gewindegänge der HeliCoil- bzw. BaerCoil-Gewindeeinsätze zu, siehe Abb. 197, Bild 2. Dieser Klebstoff musste nach dem Aushärten aus den Schraublöchern ausgebohrt und die Gewindeeinsätze nachgeschnitten werden, vgl. Abb. 197, Bild 3 und 4.

Bei den Pull-Out-Proben wurde darüber hinaus noch Einspannbohrungen gesetzt. Diese Arbeiten sind in der folgenden Bilderreihe dargestellt.



1. Egalisierung der stirnseitigen Unebenheiten durch flächiges Schleifen.



2. Ausbohren des Klebstoffs.



3. Nachschneiden zur Beseitigung der letzten Klebstoffreste aus den Gewindegängen des Gewindeeinsatzes.

Abb. 262: Zusätzliche Arbeitsschritte zur Erstellung der Randanbindungstestkörper

Der besseren Übersichtlichkeit halber sind alle bisher gefertigten Insert-Sandwichprobekörper in den Tab. 29, Seite 175 sowie Tab. 30, Seite 176 dokumentiert.

4.4.7.4.2.3 Probekörperfertigung der Knebelproben

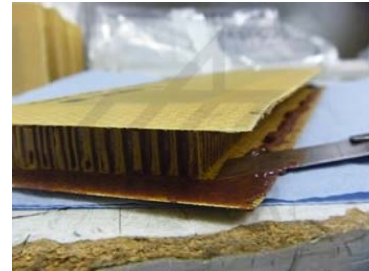
Die Fertigung der Probekörper für die Knebeltests erfolgte analog der Fertigung der Pull-Out-Probekörper der Topf- und Schraubinserts beim DLR FA FLB, vgl. z. B. Abschnitt vgl. Abschnitt 2.4.3.5.2 ab Seite 97. Daher wir hier nur auf die Besonderheiten in Form einer Bilderfolge eingegangen.



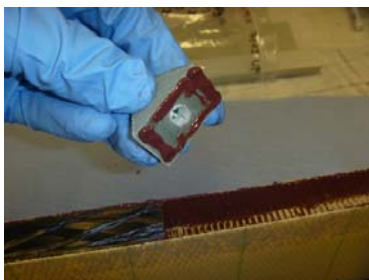
1. Formatierung der CFK-Vierkanthohlprofile auf die richtige Länge.



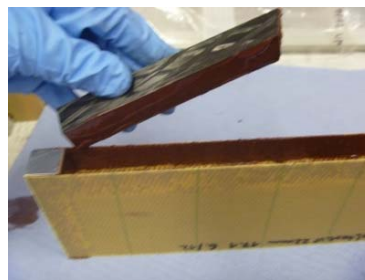
2. Probemontage eines Knebeltestprobekörpers.



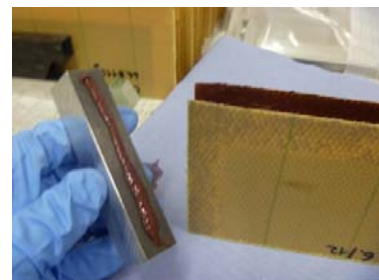
3. Auftragen und Verstreichen der Klebstoffraupe mit Hilfe eines Cuttermessers.



4. Einsetzen des GFK-Trapezklötzchens.



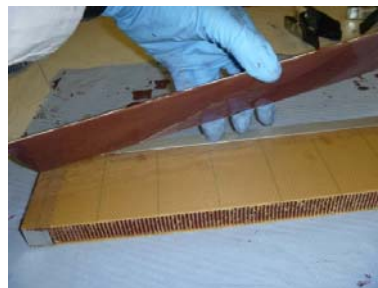
5. Einsetzen der CFK-Vierkanthohlprofile.



6. Einsetzen der Aluminium-Randprofile.



7. Einsetzen des Aluminium-Endprofils.



8. Aufkleben der Doubler.



9. Fixierung der Komponenten im Sandwichhalbezeug mittels Klammern und Zwingen während der Klebstoffaushärtung.

Abb. 263: Fertigung der Probekörper für die Knebeltests am Randlasteinleitungskonzept.

Auch bei den Knebeltestprobekörpern drang Klebstoff in die Gewindebohrung des GFK-Klötzchens ein und musste nach dem Aushärten durch Ausbohren und Gewindeschneiden entfernt werden, vgl. auch Abb. 110, Bild 3 und 4.

4.4.7.5 Tests der Randlasteinleitungskonzepte

4.4.7.5.1 Transversale und flächenparallele Lasttests

Es wurden sowohl Pull-Out-, Shear- und Knebeltests am Randlasteinleitungskonzept „GKF-Klötzchen“ durchgeführt. Die Testgrundlagen und Voraussetzungen, der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die Dokumentation der Tests per Kraft-Weg-Messung, Video und Fotoaufnahmen sowie Mitschriften wird in Abschnitt 2.5.5, ab Seite 179 näher erläutert. Die Knebeltests wurden mit Testaufbau, wie er auf Abb. 176 auf Seite 160 zu sehen ist, durchgeführt. Die kurzen Knebel müssen unter Flugbedingungen das Herausrutschen von sog. „Standardunits“ (z. B. Ofen- oder Kaffeemaschineneinsatz) verhindern. Diese weisen eine maximale Masse von 40 kg auf. Für das Passagierflugzeug Boeing 777 wird eine maximale Lastüberhöhung durch Beschleunigungen durch z. B. bei Turbulenzen im Flug von 3 g in y-Richtung von der Fa. Boeing vorgegeben. Mit einem zusätzlichen Sicherheitsfaktor von 1,33 ergibt sich damit eine maximale Last auf den Knebel von:

$$F_{y,max} = 40kg \cdot 10 \frac{N}{kg} \cdot 3 \frac{m}{s^2} \cdot 1,33 \approx 1600N \quad [N] \quad (8)$$

Eine Spezifikation der Tests ist ebenfalls im Dokument der Fa. SELL GmbH dokumentiert: „Zerlik_R_Testreport_Innovative_Inserts_SELL_K-1156ALL-1001-22_Rev._new.docx“

4.4.7.5.2 Knebeltests

Es wurden je fünf Tests an zwei unterschiedlichen Varianten durchgeführt, dies waren eine unverstärkte sowie eine mit Doublern und einem U-Profil verstärkte Variante. Bis zu einer Belastung von 1600 N müssen die Knebel unbeschädigt bleiben, siehe Abschnitt 2.4.7.5. Um dies prüfen zu können, wurden die Tests zweistufig ausgeführt. Zunächst wurden die Knebel bis 1600 N be- und wieder entlastet und auf Schädigungen (Knistergeräusche während der Belastung, bleibende Winkeländerungen des Knebels usw.) untersucht. Waren keine Schädigungen zu erkennen, wurde bis zum Versagen weitergetestet.

4.4.7.6 Testergebnisse

Die Testergebnisse (die aufgenommenen Kraft-Weg-Kurven) für die Pull-Out- und die Sheartests können dem entsprechenden Testbericht entnommen werden.

4.4.7.6.1 Festigkeitsberechnung unter transversaler und flächenparalleler Belastung

Die Berechnung der Festigkeiten des Randeinleitungskonzepts unter transversaler als auch flächenparalleler Belastung sowie im Knebeltest aus den Rohdaten erfolgte nach der in 2.5.6 dargestellten Vorgehensweise. Sie können den folgenden Dokumenten entnommen:

„F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FTr\02_Figures_errorbars_innov_Inserts_2014“

4.4.7.6.2 Berechnung der Mittelwerte der Maximallasten, statistische Auswertung

Das allgemeine Vorgehen ist in Abschnitt 2.5.6 beschrieben.

4.4.7.6.3 Massenbestimmung der Einzelkomponenten

Die Gewichtsbestimmung der Einzelteile des Randeinleitungskonzepts erfolgte nach dem in Kapitel 2.6 beschriebenen Verfahren.

4.4.7.6.4 Bestimmung der Verbindungsgüten des Randeinleitungskonzepts

Eine Berechnung der Verbindungsgüten des Randeinleitungskonzepts wurde nicht vorgenommen, da keine Testdaten für die konventionelle Bauweise vorlagen.

4.4.7.7 Ergebnisübersicht

In den folgenden beiden Tabellen sind die mittleren Festigkeiten und Massen sowie Verbindungsgüten des Randeinleitungskonzepts zusammengefasst dargestellt, dies unter transversaler Belastung bzw. flächenparalleler Belastung und im Knebeltest.

Die Informationen zu den mittleren Versagenslasten sind den Dokumenten zu entnehmen:

„F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FTr\02_Results_clean_innov_Inserts_2014“. Die Informationen zu den Massenberechnungen sind den Dokumenten zu entnehmen: „2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx“.

Insertkonzept	Randlasteinleitungskonzept	
Insertmaterial	Alu	Alu
Sandwichtyp	616 HC (10 mm)	618 HC (22 mm)
Ohne Verstärkung		
Mittlere Versagenslast	3611,5 N	9428,3 N
Gesamtgewicht	52,85 g	140,16 g
Verbindungsgüte	N/g	N/g
Mit beidseitiger Verstärkung („Doubler beidseitig“)		
Mittlere Versagenslast	3330 N	11430,3 N
Gesamtgewicht	69,18 g	221,79 g
Verbindungsgüte	/ N/g	/ N/g

Tab. 31: Verbindungsgüte des Randlasteinleitungskonzepts unter transversaler (Pull-Out) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.²⁰

Insertkonzept	Randlasteinleitungskonzept	
Insertmaterial	Alu	Alu
Sandwichtyp	616 HC (10 mm)	618 HC (22 mm)
Ohne Verstärkung		
Mittlere Versagenslast	3013,7 N	5350,2 N
Gesamtgewicht	4,46142 g	33,22542 g
Verbindungsgüte	N/g	N/g
Mit beidseitiger Verstärkung („Doubler beidseitig“)		
Mittlere Versagenslast	3964,3 N	12265,2 N
Gesamtgewicht	15,52 g	92,1 g
Verbindungsgüte	/ N/g	/ N/g

Tab. 32: Verbindungsgüte des Randlasteinleitungskonzepts unter flächenparalleler (Shear) Last, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.²¹

²⁰ Quellen:

F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FTr\02_Results_clean_innov_Inserts_2014

Mittlere Gewichte: 2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx

²¹

Quellen:

Insertkonzept	Randlasteinleitungskonzept
Insertmaterial	Alu
Sandwichtyp	618 HC (22 mm)
Ohne Verstärkung	
Mittlere Versagenslast	3371,3 N
Gesamtgewicht	91,44622 g
Verbindungsgüte	N/g
Mit beidseitiger Verstärkung („Doubler beidseitig“)	
Mittlere Versagenslast	3970,7 N
Gesamtgewicht	443,4 g
Verbindungsgüte	/ N/g

Tab. 33: Verbindungsgüte des Randlasteinleitungskonzepts, Knebeltests, ohne Schraubenanteile. Über die jeweils 5 Tests gemittelte Werte.²²

4.4.7.8 Leistungsvergleich zu konventionellen Inserts

Es wurde kein Leistungsvergleich des Randlasteinleitungskonzepts vorgenommen, da keine Testdaten für die konventionelle Bauweise vorlagen.

4.4.7.9 Lessons learned: Empfehlungen für Weiterentwicklungen

Die getesteten Probekörper zeigten neben anderen Schädigungen am äußeren Rand der GFK-Klötzchen Delaminationen am Lochrand neben dem eingesetzten HeliCoil, siehe Abb. 199. Hier wurde die erste GFK-Lage durch die Belastung vom GFK-Klötzchen gelöst. Dies führte jedoch nicht zu einem Versagen der Verbindung, die Schädigung blieb lokal. Als Abhilfemaßnahmen sollte die bisher in den Probekörpern oberflächenbündig gesetzten HeliCoil-Einsätze tiefer in die GFK-Klötzchen eingeschraubt werden, um die erste Faserlage zu entlasten (um ca. 1 – 1,5 mm versenkt). Eine weitere Maßnahme wäre die Änderung der Ausrichtung der Fasern in den GFK-Klötzchen, beispielsweise parallel zum Schraubenschaft, siehe Abb. 200.



Abb. 264: Lokale Delamination der ersten Faserlage im GFK-Klötzchen im Bohrungsrandbereich.



Abb. 265: Empfehlungen zur Vermeidung des Ablösens der ersten Faserschicht.

F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FTr02_Results_clean_innov_Inserts_2014

Mittlere Gewichte: 2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx

²² Quellen:

F:\wolf_js\InGa_Inserttests_Daten+Bilder\05_Auswertung_Python_FTr02_Results_clean_innov_Inserts_2014

Mittlere Gewichte: 2015-08-21_InGa_TestMatrix_v70_JWo.xlsx

4.5 Experimentelle Ermittlung der Belastungsfähigkeit der Insertkonzepte

4.5.1 Allgemeine Testgrundlagen

In diesem Abschnitt erfolgt eine allgemeine Übersicht über die Testrandbedingungen, die für alle 2014er Tests an konventionellen sowie innovativen Insertlasteinleitungen gelten. Die Testdurchführung, Auswertung und Bewertung der Ergebnisse sowie der Leistungsvergleich der einzelnen innovativen Insertkonzepte sind hingegen in den Einzelabschnitten zu den einzelnen Insertkonzepten eingegliedert.

Alle Tätigkeiten im Projekt InGa zu den mechanischen Tests an den Insertkonzepten werden im Folgenden dargestellt, untergliedert in den untenstehenden Ablauf.

1. Allgemeine Testgrundlagen
2. Sandwichprobekörper
3. Testeinrichtungen
4. Durchführung
5. Dokumentation
6. Berechnung der Erstversagenslasten und statistische Auswertung

Es wurden sowohl Pull-Out- auch Sheartests, mit den Randprofilkonzept ebenfalls Knebelbiegetests durchgeführt.

4.5.2 Sandwichprobekörper

4.5.2.1 Dimensionierung

Für Tests an Insertlasteinleitungen in Sandwichelementen ist dem Autor bis heute kein Standard bzw. keine Regelnorm bekannt. Es gibt Standards für den Auszug von metallischen Einsätzen aus Kunststoffbauteilen, z. B.:

- DVS-EFB 3440-1...4, „Function elements (blind rivet-, press form elements, hole and thread forming elements)“
- DVS 2240-1 (2005-05), „Thread inserts for the joining of mouldings made of plastics“

Diese Normen berücksichtigen jedoch nicht den Sandwichaufbau (Waben- oder Schaumkern) und die daraus resultierende, unterschiedliche Versagensmechanik.

In unterschiedlichen Literaturquellen sind daher unterschiedlichste Testrigs für Insertbelastungstests zu finden. Diese weisen z. T. runde, z. T. zweiseitige, ebenen Randabstützungen auf. Auch die Durchmesser bzw. Abstände der Einspannungen variieren, (50), (15), (9), (51), (52), (6), (43), (11), (10), (53) (54).

Die Größe der Sandwichprobekörper wurden daher eigenständig definiert und der mechanische Einflussbereich des Inserts zu Grunde gelegt. So wird für den Abstand des Inserts zur Randeinspannung bzw. zum nächsten Insert genau die Strecke gewählt, auf der das lokale Spannungsgefüge im Bereich des Inserts wieder auf das globale Spannungsbild des Sandwichpaneels abgeklungen ist bzw. sich normalisiert hat. Der Sandwichrand „merkt“ also nichts mehr von der lokalen Lasteinleitung des Inserts in der Mitte des Sandwichpaneels.

Diese „Abklingabstände“ werden als Störungseinflussradius bezeichnet und sind für Pull-Out- und Shearbelastungen unterschiedlich groß. Nach (24) gilt für eine Pull-Out-Belastung der fünffache Radius, bei einer Shear-Belastung der dreifache Radius des Inserts als Störeinflussradius, siehe Abb. 201.

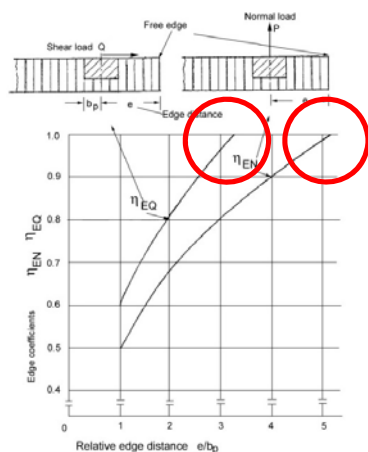


Abb. 266: Randeinflusskoeffizient unter Pull-Out- und Shearbelastung (24)

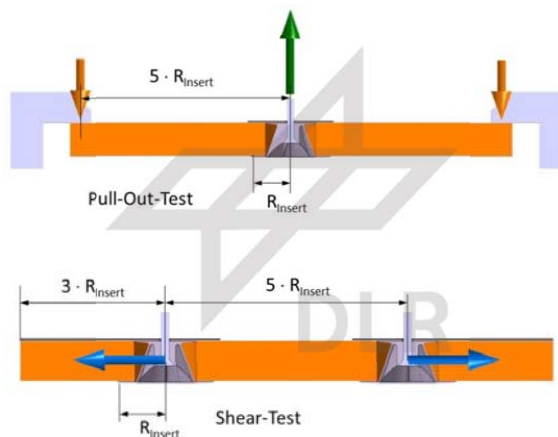


Abb. 267: Minimaler Abstand der Insertmittelpunkte zu den Einspannbacken sowie der Inserts.

Demnach sind reale Versagensarten und –größen von Insertlasteinführungen nur ermittelbar, wenn im Sandwichprobekörper der lokale, durch das Insert induziert Spannungseinfluss vollständig bis zu den Einspannstellen abgebaut ist. Die Auslegung und CAD-Konstruktion der Testsandwichkörper wurde unter Berücksichtigung der entsprechenden Störeinflussradien der innovativen Inserts unter transversaler wie auch flächenparalleler Belastung vorgenommen. Die entsprechenden Zeichnungsableitungen wurden der Fa. SELL GmbH zur Fertigung der Testsandwichpaneele zur Verfügung gestellt.

Zur Reduzierung des Zuschnittaufwands und der Variantenvielfalt der Testsandwichpaneele wurde der Bitte der Fa. SELL GmbH entsprochen, jeweils die Dimensionen des je Inserttestkonfiguration größten Sandwichpaneels für alle Testpaneele zu übernehmen, siehe Tab. 29, Seite 175 sowie Tab. 30, Seite 176, jeweils Spalte 3.

4.5.2.2 Beschriftung der Probekörper

Eine anschließende, beidseitige Beschriftung der Insert-Sandwichtestkörper erfolgte nach dem in Abb. 203 dargestellten Schema auf dem Randbereich der Sandwichpaneele.

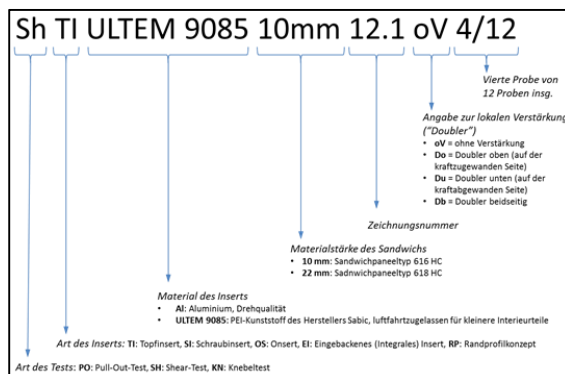


Abb. 268: Beschriftungsschema der Insert-Sandwichtestkörper

4.5.2.3 Übersicht Geometrien der Insert-Sandwichprobekörper

Folgend sind alle Testpaneelgrößen, die im Projekt InGa getestet wurden, gelistet.

Inserttyp, Innovatives Insertkonzept	Maximaler Durch- messer des Insert- körpers	Dimensionen Insert-Sandwich- probekörper [Länge x Breite x Stärke]	Lichte Breite zwischen den Einspannungen / Minimaler Abstand zwischen Insert- und Einspannungs- rand	Dimensionen der lokalen Verstärkungen („Doubler“)	Zeich- nungsnr.
	[mm]	[mm x mm x mm]	[mm / mm]	[mm x mm mm]	
Topfininsert Alu, 22 mm	57	618 HC, 320 x 290 x 22	290 / 116,5	62 x 62 x 1	01.1
Topfininsert Alu, 10 mm	49	616 HC, 275 x 245 x 10	245 / 98	53 x 53 x 1	02.1
Topfininsert ULTEM 9085, 22 mm	58	618 HC, 320 x 290 x 22	290 / 116	62 x 62 x 1	03.1
Topfininsert ULTEM 9085, 10 mm	45	616 HC, 275 x 245 x 10	245 / 100	53 x 53 x 1	04.1
Schraubinsert Alu, 22 mm	44	618 HC, 320 x 290 x 22	290 / 123	62 x 62 x 1	05.1
Schraubinsert Alu, 10 mm	36	616 HC, 275 x 245 x 10	245 / 104,5	53 x 53 x 1	06.2
Randanbindung Voll- GFK-Trapezkörper, 20 x 20 mm	k. A.	618 HC, 280 x 225 x 22	k. A.	225 x 40 x 1	07.1
Randanbindung Voll- GFK-Trapezkörper, 8 x 8 mm	k. A.	616 HC, 136 x 125 x 10	k. A.	125 x 16 x 1	08.2
Onsert Click Bond CB4564 V 3-12 P, Typ Kabelbinder	31,75	616 HC, 75 x 60 x 10	40 / 4,1	75 x 60	26.1
Onsert Click Bond CB4002 V 3 CR 8, Typ Gewindebuchse	31,75	616 HC, 75 x 60 x 10 sowie 616 HC, 275 x 245 x 10	40 / 4,1 sowie 245 / 106,6	75 x 60 x 1 sowie 40 x 40 x 1	24.1
Integrales Insert 616 HC: Steckklebekonzept mit KVT-Inserthalbkörper F2/S23-M6x10 mod. + KVT-Inserthalbkörper F2/S23-M8x10 mod.	23	130 x 100 10	100 / 38,5	40 x 40 x 1	18.2, 20.1
Integrales Insert 618 HC: Schraubkonzept mit KVT- Inserthalbkörper F2/S20- M6x22 mod. + KVT- Inserthalbkörper M1/B20- M6x20 mod.	20	130 x 100 22	100 / 40	40 x 40 x 1	19.2, 22.1

Tab. 34: Dimensionen der Insert-Sandwichprobekörper für Tests unter transversaler Belastung (Pull-Out).

Inserttyp, Innovatives Insertkonzept	Maximaler Durch- messer des Insert- körpers	Dimensionen Insert- Sandwich- probekörper [Länge x Breite x Stärke]	Lichte Breite zwischen den Einspannungen / Minimaler Abstand zwischen Insert- und Einspannungs- rand	Dimensionen der lokalen Verstärkungen („Doubler“)	Zeich- nungsnr.
	[mm]	[mm x mm x mm]	[mm / mm]	[mm x mm mm]	
Topfininsert Alu, 22 mm	57	319 x 174 x 22	145 / 58,5	120 x 62 x 1	09.1
Topfininsert Alu, 10 mm	49	269,5 x 147 x 10	122,5 / 49	102 x 53 x 1	10.1
Topfininsert ULTEM 9085, 22 mm	58	319 x 174 x 22	145 / 58	120 x 62 x 1	11.1
Topfininsert ULTEM 9085, 10 mm	45	269,5 x 147 x 10	122,5 / 51	102 x 53 x 1	12.1
Schraubinsert Alu, 22 mm	44	319 x 174 x 22	145 / 65	120 x 62 x 1	13.2
Schraubinsert Alu, 10 mm	36	269,5 x 147 x 10	122,5 / 55,5	102 x 53 x 1	14.3
Randanbindung Voll- GFK-Trapezkörper, 20 x 20 mm	k. A.	280 x 225 x 22	171 / 0	225 x 40 x 1	15.2
Randanbindung Voll- GFK-Trapezkörper, 8 x 8 mm	k. A.	136 x 125 x 10	95 / 0	125 x 16 x 1	16.3
Onsert Click Bond CB4564 V 3-12 P, Typ Kabelbinder	31,75	110 x 75 x 10	70 / 4,125	110 x 75 x 1	27.1
Onsert Click Bond CB4002 V 3 CR 8, Typ Gewindebuchse	31,75	110 x 75 x 10	70 / 4,125	110 x 75 x 1	25.1
Integrales Insert 616 HC: Steckklebekonzept mit KVT- Inserthalbkörper F2/S23-M6x10 mod. + KVT- Inserthalbkörper F2/S23-M8x10 mod.	23	110 x 75 x 10	50 / 18,5	40 x 40 x 1	18.2, 21.1
Integrales Insert 618 HC: Schraubkonzept mit KVT- Inserthalbkörper F2/S20- M6x22 mod. + KVT- Inserthalbkörper M1/B20- M6x20 mod.	20	110 x 75 x 22	50 / 20	40 x 40 x 1	19.2, 23.1
Knebeltests Voll-GFK- Trapezkörper, 20 x 20 mm	k. A.	340x 96 x 22	160 / 0	340 x 80	17.1

Tab. 35: Dimensionen der Insert-Sandwichprobekörper für flächenparallele Belastung (Shear) sowie Knebeltests.

4.5.3 Testeinrichtungen

Testaufbau

Sowohl die Zug-, Schub- als auch die Knebeltests wurden mit Hilfe einer weggesteuerten Zugmaschine der Marke Zwick, Typ 1474, bei der Fa. SELL GmbH vorgenommen. Die Verarbeitung der Daten erfolgte mit dem Programm TestXpert II der Fa. Zwick Roell.

Für die Tests unter transversaler Belastung wurden die Sandwichprobekörper mit Hilfe von zwei Spannbacken seitlich fixiert und an der Verschraubung der Inserts vertikal gezogen, siehe Abb. 204, Mitte sowie Abb. 205.

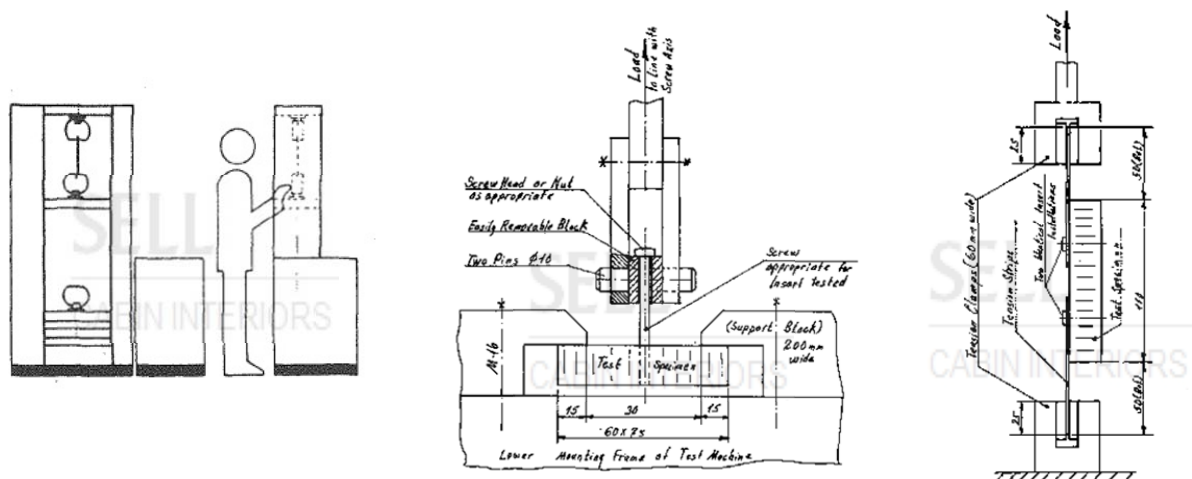


Abb. 269: Schemata des Versuchsaufbaus sowie der Zug- und Schubtests (36), (55).

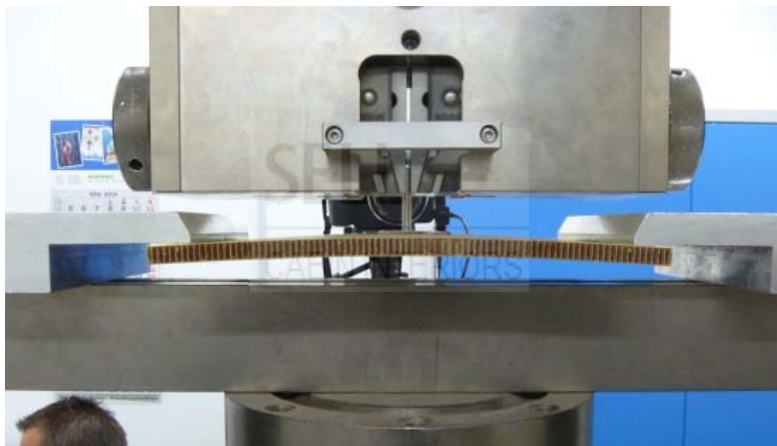


Abb. 270: Aufbau für Tests an Inserts und Randlasteinleitungen unter transversaler Belastung (Pull-Out).

Bei den Versuchen unter flächenparalleler Belastung an Insertkörpern für Randlasteinleitungen wurden aus Symmetriegründen jeweils zwei identische Inserts im Testkörper installiert. An den Insert-Zentralverschraubungen wurden metallische Zugplatten verschraubt, die wiederum in die Spannbacken der Testmaschine eingespannt wurden, siehe Abb. 204, rechts.



Abb. 271: Aufbau für Tests an Inserts und Randlasteinleitungen unter flächenparalleler Belastung (Shear).

Für die Knebeltests an den Randlasteinleitungen wurde ein spezielles Testrig der Fa. SELL GmbH genutzt, siehe Abb. 207.



Abb. 272: Knebeltests an Randlasteinleitungen mit Testrig der Fa. SELL GmbH.

4.5.4 Durchführung

Pro Konfiguration wurden jeweils fünf Tests unter transversaler und flächenparalleler Belastung durchgeführt. Dies führte zu einer Gesamtanzahl ca. 440 Tests.

Parameter bei allen Messungen:

- Zuggeschwindigkeit: 10 mm/min.
- Lastabschaltung bei 50% Abfall der Last proportional zum Deformationsweg.
- Alle Tests wurden mit Video- und Fotoaufnahmen während des Tests dokumentiert.

4.5.5 Dokumentation

Die Tests wurden, neben der Kraft-Weg-Messung mit dem Programm TestXpert II, ausführlich mit Video- sowie Fotoaufnahmen dokumentiert. Eine Aufnahme der Schadensbilder erfolgte in Einzel- und Gruppenaufnahmen. Alle Aufnahmen sind auf dem Projektlaufwerk des DLR FA-FLB archiviert.

Nebenbei wurden z. B. Knistergeräusche, die z. T. bereits bei geringen Kräften zu hören waren, handschriftlich protokolliert. Die Mitschriften sind auf dem Projektlaufwerk des DLR FA-FLB archiviert.

4.5.6 Berechnung der Erstversagenslasten und statistische Auswertung

Mit Hilfe eines Algorithmus, programmiert mit dem Programm Python 2, wurden die einzelnen Kraftmaxima herausgefiltert. Dazu vergleicht der Algorithmus die einzelnen Messwerte mit den umliegenden Messwerten (50 vordere und 50 hintere „Testwertnachbarn“). Ist der betrachtete Einzelmesswert größer als alle benachbarten Messwerte, wird er als lokales Maximum bewertet. Das erste Maximum wurde dem Erstversagen zugeschrieben.

Aus dem Durchschnitt der Erstmaxima der jeweiligen fünf Proben wurde eine mittlere Erstversagenlast berechnet. Setzeffekte (kleinere Einbrüche in den Kraft-Weg-Kurven, die durch ein kurzes Durchrutschen der Schraube in der Einspannung der Zugmaschine verursacht wurden) wurden bei der Berechnung des Erstmaximums hingegen nicht beachtet.

Das zweite globale Kraftmaximum wird als Zweit- oder Komplettversagen der Insertverbindung interpretiert.

Die statistische Auswertung, also die Berechnung der Standardabweichungen und des X^2 -Werts sowie die Ableitung der Allowable Loads nach MIL-Standard erfolgte nach dem Vorgehen in, siehe Abb. 208.

6.5 Statistical Evaluation

The Design Values will be derived from the twelve (12) Failure Loads applied to the Test Sample, using the statistical methods described in MIL-HDBK-5F, Chapter 9.

The following values will be determined :

Mean Load Value : $P_m = \frac{\sum_1^n P_i}{n}$

Standard Deviation : $S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (P_i - P_m)^2}{n - 1}}$

MIL-HDBK-5F, Par. 9.2.2.3

$n = 12$ = Number of Specimens

Test for Normality : "Chi-squared" Method, described in MIL-HDBK-5F, Par. 9.6.1.3

- Twelve (12) Intervals of equal area under the Normal Curve will be established, based on the Mean Load P_m , and the Standard Deviation S , as described in MIL-HDBK-5F. Interpolating Table 9.6.4.6 in MIL-HDBK-5F, the **upper** limits of the 12 intervals are :

$$\begin{array}{ll} I_1 = P_m - 1,3831 * S & ; I_7 = P_m + 0,2103 * S \\ I_2 = P_m - 0,9673 * S & ; I_8 = P_m + 0,4307 * S \\ I_3 = P_m - 0,6745 * S & ; I_9 = P_m + 0,6745 * S \\ I_4 = P_m - 0,4307 * S & ; I_{10} = P_m + 0,9763 * S \\ I_5 = P_m - 0,2103 * S & ; I_{11} = P_m + 1,3831 * S \\ I_6 = P_m + 0,0 & ; I_{12} = P_m + 1000,0 * S \end{array}$$

- The actual Test Failure Loads of the series are then compared to the expected frequency, using the following Formula :

$$\chi^2 = \sum_1^n \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e}$$

f_o = Actual Frequency of Loads in each Interval

$f_e = 1$ = Expected Frequency of Loads in each Intreval

- The Sum χ^2 is then compared to the Upper Limit of **16,92**. (MIL-HDBK-5F, Table 9.6.4.3 for $12-3 = 9$ Degrees of Freedom) If χ^2 is less than the Upper Limit, a Normal Distribution can be assumed, and the Allowable Load can be computed.

Allowable Load : $P_{A17} = P_m - S * K_B$

$K_B = 2,21$ = Tolerance Limit Factor, B Value, 0,9 confidence
MIL-HDBK-5F, Table 9.6.4.1

Abb. 273: Statistische Analyse der Erstversagenslastwerte der Inserttests nach FA. SELL GmbH, (35), (36), (39).

4.6 Massenermittlung der Komponenten der Insertlasteinleitungen

Um die Verbindungsgüte von Insertverbindungen bestimmen zu können, muss von den einzelnen Komponenten der Insertverbindung die genaue Masse bekannt sein. Dazu wurden die Einzelkomponenten vor der Montage zu den Gesamtsandwichtestpaneelen entweder direkt gewogen oder mit Hilfe der Gesamtmasse sowie der Massen aller anderen Einzelkomponenten auf die fehlende Masse einer Komponente zurückgerechnet.

Die Masse der Komponenten wurde je nach Größe und Gewicht entweder mit einer Waage des Typs Sartorius analytic A200S oder des Typs VWR LP-2102i ECN 611-2302 bestimmt. Die Dokumentation erfolgte mittels Fotografie.

In das Gewicht der Insertverbindung werden die in Abb. 209 rot dargestellten Elemente bzw. Bauteilanteile einbezogen. Relevant für die Massenermittlung sind:

1. Die Masse des Gesamtprobekörpers mit integrierter Insertverbindung Die Masse des Insertkörpers.
2. Die Masse des Sandwichpaneels
3. Die Massen der Klebstoffportion, die zur Anbindung des Insertkörpers an den Kern eingesetzt wird (sog. „Potting“).
4. Die Massen der lokalen Verstärkungen der Deckschichten („sog. Doubler“).
5. Die Klebstoffportionen, die ggf. zur Befestigung der lokalen Verstärkungen bzw. „Doubler“ eingesetzt werden.
6. Die Klebstoffportion, die zur Befestigung der unteren lokalen Verstärkung bzw. „Doubler“ eingesetzt wird (falls vorhanden).

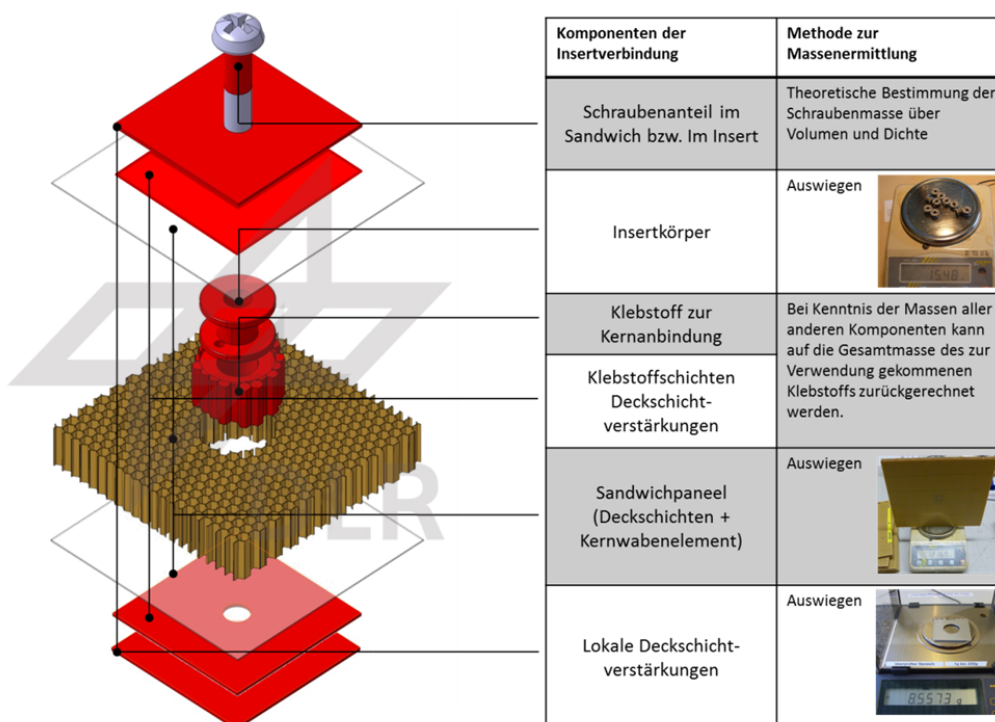


Abb. 274: Einzelkomponenten einer Insertverbindung, deren Massen in die Berechnung der Verbindungsgüten eingehen (gewichtsrelevante Elemente sind rot eingefärbt).

Die Massen wurden protokolliert und dienen zur Berechnung der Verbindungsgüte der Insertkonzepte.

4.6.1 Massen der Sandwichtypen 618 HC und 616 HC

Die Sandwichpaneele zur Darstellung der Probekörper wurden vor Montage der Insertverbindung ausgewogen und eine Durchschnittsdichte der Sandwichpaneele gleicher Geometrie berechnet. Zum Vergleich dargestellt sind folgend die von der Fa. SELL GmbH gegebenen Durchschnittsdichten, vgl. Tab. 6, Seite 73.

Die Einzeldichten bzw. Flächengewichte der Deckschichten und des Kernmaterials der Sandwichtypen 616 HC und 618 HC können ebenfalls berechnet werden, da die Sandwichtypen diese bis auf die Kernhöhe die gleichen Werkstoffe und Parameter aufweisen und durch Auswiegen die Gesamtdichten und -gewichte bekannt sind:

$$\begin{aligned} m_{618\text{ HC}} &= m_{\text{Kern } 618\text{ HC}} + m_{\text{DS}} = V_{\text{Kern } 618\text{ HC}} \cdot \rho_{\text{Kern}} + V_{\text{DS}} \cdot \rho_{\text{DS}} \\ m_{616\text{ HC}} &= m_{\text{Kern } 616\text{ HC}} + m_{\text{DS}} = V_{\text{Kern } 616\text{ HC}} \cdot \rho_{\text{Kern}} + V_{\text{DS}} \cdot \rho_{\text{DS}} \end{aligned} \quad (9)$$

Wahlweise wird die erste Gleichung nach der gemeinsamen Deckschichtdichte aufgelöst:

$$\rho_{\text{DS}} = \frac{m_{618\text{ HC}} - (V_{\text{Kern } 618\text{ HC}} \cdot \rho_{\text{Kern}})}{V_{\text{DS}}} \quad (10)$$

Die resultierende Gleichung wird in die erste Formel (9) eingesetzt:

$$m_{618\text{ HC}} = V_{\text{Kern } 618\text{ HC}} \cdot \rho_{\text{Kern}} + V_{\text{DS}} \cdot \left(\frac{m_{618\text{ HC}} - (V_{\text{Kern } 618\text{ HC}} \cdot \rho_{\text{Kern}})}{V_{\text{DS}}} \right) \quad (11)$$

Nach der Kerndichte aufgelöst:

$$\rho_{\text{Kern}} = \frac{(m_{618\text{ HC}} - m_{616\text{ HC}})}{V_{\text{Kern } 618\text{ HC}} - V_{\text{Kern } 616\text{ HC}}} \quad (12)$$

Wird dies in Formel 6 eingesetzt, kann auch die Deckschichtdichte berechnet werden:

$$\rho_{\text{DS}} = \frac{m_{618\text{ HC}} - \left(V_{\text{Kern } 618\text{ HC}} \cdot \frac{(m_{618\text{ HC}} - m_{616\text{ HC}})}{V_{\text{Kern } 618\text{ HC}} - V_{\text{Kern } 616\text{ HC}}} \right)}{V_{\text{DS}}} \quad (13)$$

Die Berechnung der Einzeldichten der Deckschicht- und den Kernmaterialien wurde im Dokument „2015-02-04_Dichte-und_Flächengewichtbestimmung_618_HC_v01_JWo.xlsx“ vorgenommen. Die Ergebnisse der Massen und Dichten der Einzelkomponenten der Sandwichtypen 618 HC sowie 616 HC sind in Tab. 6, Seite 73 zu finden.

4.6.2 Massen der Insertkörper

Die Inserts wurden nummeriert, einzeln ausgewogen, mit ihrem Gewicht beschriftet und fotografiert, siehe Tab. 9, Seite 80. Die beiden Einzelteile der Schraubinserts und die Inserthalbkörper des Schraub- sowie Steckkonzepts der integrierten Inserts wurden gemeinsam gewogen. Pro Inserttyp wurden 10 Exemplare ausgewogen, um einen statistisch belastbaren Gewichtsmittelwert berechnen zu können.

4.6.3 Massen der lokalen Verstärkungen („Doubler“)

Die Massen der lokalen Aluminium-Deckschichtverstärkungen („Doubler“) wurden durch Wiegen ermittelt, hierzu wurde die Präzisionswaage vom Typ Sartorius analytic A200S verwendet. Die Testsandwichkörper wurden mit dem Gewicht der zugehörigen Doubler beschriftet, eine Dokumentation der Massenermittlung erfolgte per Fotografie. Die Massen sowie die abgeleitete, mittlere Dichte der lokalen Verstärkungen von 2,67 kg/dm³ sind unter anderem in (56) zu finden. Die gemessene Dichte korreliert sehr gut mit den üblichen Literaturangaben für die Dichte von Aluminium (2,7 kg/dm³).

4.6.4 Massen der gesamten Insert-Sandwichprobekörper

Nach dem Aushärten des Klebstoffs und ggf. dem Ausbohren des überflüssigen Klebstoffs wurde von den Insert-Sandwichprobekörpern die Gesamtmasse durch Auswiegen ermittelt.

4.6.5 Massen des Klebstoffs

Da die Massen der zur Verwendung gekommenen Klebstoffmengen nicht direkt durch Auswiegen ermittelt werden können, müssen sie „rekursiv“ über eine Differenzbildung bestimmt werden. Hierzu werden zunächst die fertigen, kompletten Insert-Sandwichprobekörper inkl. der gesamten Sandwichverbindung ausgewogen. Von dieser Gesamtmasse werden die Einzelmassen der gewogenen Einzelkomponenten abgezogen, so dass die Masse des eingesetzten Klebstoffs übrig bleibt:

$$m_K = m_{TSK} - (m_I + m_D) \quad [g] \quad (14)$$

Variable:

Beschreibung	Variable	Einheit
Masse des Inserts	m_I	[g]
Gesamtmasse des Insert-Sandwichprobekörpers inklusiv der Insertverbindung	m_K	[g]
Masse des benötigten Klebstoffs	m_K	[g]
Masse(n) der lokalen Deckschichtverstärkung(en) bzw. Doubler	m_D	[g]

Tab. 36: Variablenverzeichnis für Verbindungsgüteformeln

4.6.5.1 Ermittlung des Klebstoffanteils für die Verklebung der Doubler

Zur Ermittlung der Massenanteile des Klebstoffs, der bei den verstärkten Insertverbindungen zur Befestigungen der Doubler verwendet wurden, wurden die Klebstoffmassen der unverstärkten Variante herangezogen. Sie liefern dabei die mittlere Masse des für die Flansche der Insertkonzepte benötigten Klebstoffs, so dass auf die für die Doubler benötigten Klebstoffmengen und -massen zurückgerechnet werden kann. Da die Klebstoffbenetzte Oberfläche der Doubler bekannt ist, kann ein Klebstoffverbrauch pro dm² Doubler berechnet werden.

4.7 Verbindungsgüte als Leistungsfähigkeitsmaß

Um die der mechanischen Leistungsfähigkeit bzw. Effizienz einer Insertverbindung beurteilen zu können, wird das Tragvermögen unter Zug- und Schubbelastung mit der Masse der Insertverbindung ins Verhältnis gesetzt. Dieses Verhältnis wird im Folgenden als „Verbindungsgüte“ (Abkürzung: „VBG“) bezeichnet.

Je höher die Versagenslast der Insertverbindung im Verhältnis zu ihrer Masse ist, desto höher ist die VBG bzw. die Leichtbaugüte. Anders formuliert kann mit Hilfe der VBG beschrieben

werden, wie viel Masse mit einem bestimmten Inserttyp eingesetzt werden muss, um eine bestimmte Zug- und Schublast schädigungsfrei übertragen zu können.

Die Verbindungsgüten für Biege- und Torsionsbelastungen von Insertverbindungen werden im Projekt InGa nicht betrachtet.

Die Formel für die Verbindungsgüte einer Insertverbindung unter Zugbelastung:

$$VBG_{Zug} = \frac{P_{M,PO}}{m_I + m_S + m_K + m_D} \quad [\text{N/g}] \quad (15)$$

Die Formel für die Verbindungsgüte einer Insertverbindung unter Schubbelastung:

$$VBG_{Schub} = \frac{P_{M,Sh}}{m_I + m_S + m_K + m_D} \quad [\text{N/g}] \quad (16)$$

Variable:

Beschreibung	Variable	Einheit
Verbindungsgüte unter Zugbelastung	VBG_{Zug}	[N/g]
Verbindungsgüte unter Schubbelastung	VBG_{Schub}	[N/g]
Mittlere Erstversagenslast der Insertverbindungen unter Zugbelastung	$P_{M,PO}$	[N]
Mittlere Erstversagenslast der Insertverbindungen unter Schubbelastung	$P_{M,Sh}$	[N]
Masse des Inserts	m_I	[g]
Masse des in den Insertkörper geschraubten bzw. gesteckten Anteils der Schraube	m_S	[g]
Masse des benötigten Klebstoffs	m_K	[g]
Masse(n) der lokalen Deckschichtverstärkung(en) bzw. Doubler	m_D	[g]

Tab. 37: Variablenverzeichnis für Verbindungsgüteformeln

Damit können unterschiedliche Insertverbindungen direkt sowohl in ihrer Gewichtseffizienz als auch ihrer mechanischen Leistungsfähigkeit miteinander verglichen werden, um besonders effektive Typen ermitteln zu können.

So kann beispielsweise in einer Sandwichstruktur mit mehreren hundert Inserts eine Gewichtseinsparung von 1 g pro Insert eine deutliche Gewichtsreduzierung der Gesamtstruktur bedeuten.

Eine genauere Beschreibung der Insertverbindungselemente, die mit in die Gewichtssumme zur Berechnung der VBG eingehen, erfolgt in Abschnitt 2.6.

4.8 Demonstratoren der Insertkonzepte

4.8.1 Handdemonstratoren DLR

Für Anschauungszwecke wurden Schnittdemonstratoren der Topf- und Schraubinsertkonzepte in Verbindung mit dem GFK-Klötzchen-Randprofilkonzept aufgebaut. Diese sind folgend abgebildet.

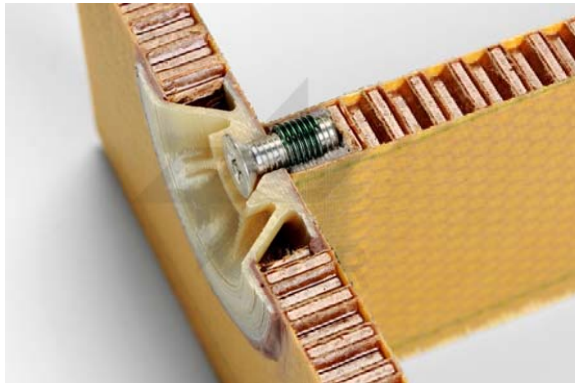


Abb. 275: Schnittdemonstrator eines Topfinserts aus dem Kunststoff ULTEM 9085 im Sandwichtyp 616 HC, mit GFK-Klötzchen-Randprofilkonzept zu einer T-Stoßverbindung aufgebaut

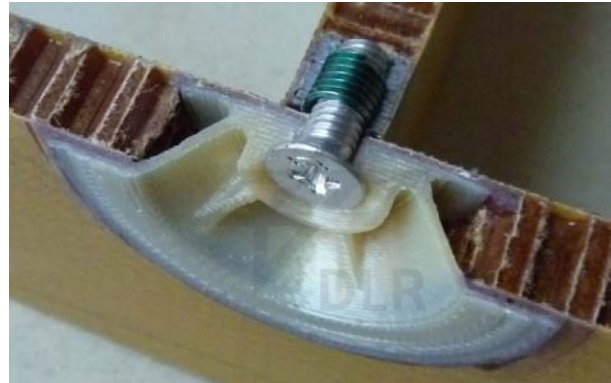


Abb. 276: Detailansicht

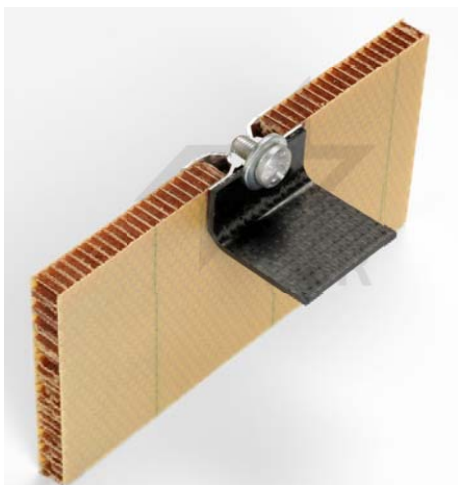


Abb. 277: Schnittdemonstrator eines Schraubinserts aus Aluminium im Sandwichtyp 618 HC mit angeschraubtem CFK-L-Profil als Beispiel für eine lokale Krafteinleitung

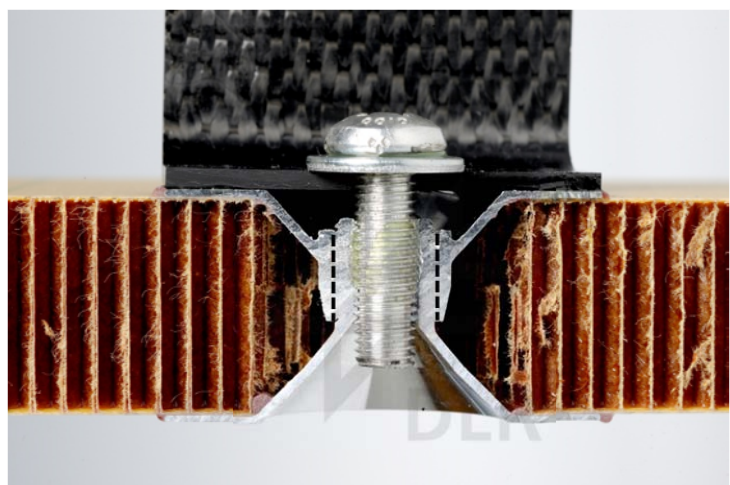


Abb. 278: Detailansicht, Gewinde zwischen den Inserthalbkörpern durch Strichlinie gekennzeichnet

4.8.2 Innovative Insertkonzepte in der Demonstratorgalley

In der von der Fa. SELL GmbH gebauten Demonstratorgalley wurden alle innovativen Insertkonzepte integriert und z. T. durch Freischnitte sichtbar gemacht, siehe Abb. 214 bis Abb. 217.



Abb. 279: Demonstratorgalley der Fa. SELL GmbH.



Abb. 280: Topfinserts zur Befestigung von demontierbaren Zwischenböden.



Abb. 281: Schraubinserts zur Befestigung der Lagerböcke der Demonstratorgalley.

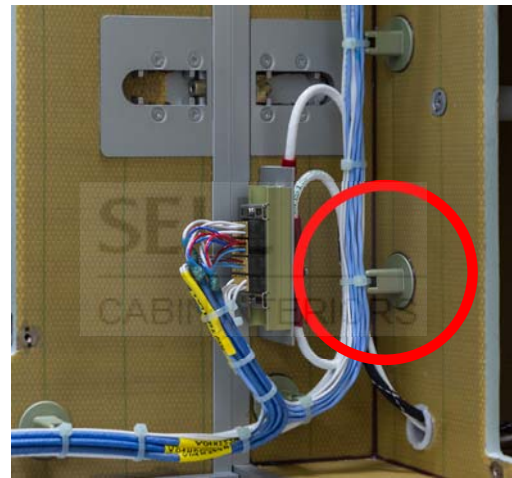


Abb. 282: Onsert zur Befestigung der Erdungsverkabelung.

4.9 Aussicht, Empfehlung für weitere Tätigkeiten

4.9.1.1 Weiterentwicklung der Insertkonzepte

- Da sich der Verzicht auf den Kernlastpfad als nicht als zielführend erwiesen hat (zum Teil geringe Verbindungsgüten, vgl. Abschnitte 2.4.3.8 sowie 2.4.5.8) sollten mechanische Tests mit den innovativen Insertkonzepten aus InGa, diesmal jedoch mit Kernanbindungen durch Vergussmasse (Potting), durchgeführt werden.
- Klick-Insertkonzept: Weiterentwicklung und Test, Überprüfung der Fertigungs- und Positionierungskonzepte, dies, ggf. zusammen mit der Fa. Schütz GmbH & Co. KGaA, siehe 2.4.5.2.4.
- Steckinsertkonzept V2: Sizing, Fertigungsuntersuchungen und Tests, Abschnitt 2.4.5.2.6.
- Mechanische Tests an innovativen Insertlasteinleitungen sollten auch mit anderen Sandwichtypen vorgenommen werden, z. B. mit Sandwichtypen, die als Grundanforderung eine hohe mechanische Leistungsfähigkeit aufweisen (z. B. für Raumfahrtanwendungen, die getesteten Sandwichtypen 616 HC und 618 HC sind auf ihre FST-Eigenschaften hin optimiert).
- Die Fa. Click Bond. Inc. bietet aus Kunststoff gefertigte Onserts an, die ähnliche Abmaße wie Insertelemente der Fa. KVT aufweisen, die als integrierte Insertkonzepte genutzt wurden. Mit diesen könnte weiteres Gewicht gespart und ebenfalls hohe Verbindungsgüten erreicht werden.
- Die Verschraubung einer Insertlasteinleitung hat häufig einen hohen Gewichtsanteil an der Gesamtverbindung. Über eine Schraubenauslegung nach VDI 2230 kann weiteres Gewicht gespart werden. Auch durch die Verwendung anderer Werkstoffe für die Schrauben (Aluminium, Titan) oder Sonderformen (Hohlschrauben, Schrauben mit flachen Köpfen) können leichtere Verbindung erzielt werden.

4.9.2 Modellbildungen für lokale Lasteinleitungen mit Insertkörpern

Aufbauend auf die im Projekt InGa gesammelten Erfahrungen zur mechanischen Wirkweise von lokalen Lasteinleitungen in Sandwichelementen können nun analytisch-mechanische Modelle abgeleitet werden, die zur Geometrieoptimierung der innovativen Insertelemente genutzt werden können. Weiterhin ist damit die Programmierung eines Auslegungstools für die Formoptimierung von Insertkörpern möglich.

Im Projekt InGa wurde aus Zeitgründen keine FE-Modellierung von Insertverbindungen vorgenommen. Diese könnte zukünftig wertvolle Ergebnisse für das Verständnis sowie die Entwicklung eines Auslegungstools liefern.

4.9.3 Weiterentwicklung der Testeinrichtungen

Ein Wechsel zur kreisrunden Lagerung des Sandwichpaneels für Inserttests unter transversaler Belastung (Pull-Out) wird vorgeschlagen, da sich eine kreisförmige Einspannung des Sandwichtestpaneels momentan zum Standard entwickelt und so die Vergleichbarkeit zu vielen aktuellen Literaturquellen erhalten bleibt, siehe Abschnitt 2.5.2.

Für eine Optimierung der Sandwichtestpaneelgrößen muss bewertet werden, ob eher kleinere oder größere Einspannweiten (und damit kleine oder große Testpaneele) in ihrem mechanischen Verhalten einer realen Sandwichstruktur entsprechen. Bei großen Einspannweiten muss der Einflussgröße der Biegelinie des Sandwichpaneels auf die Insertverbindung untersucht werden. Bei kleinen Sandwichpaneelen hingegen reagiert die Sandwichstruktur steifer, im Sandwich bildet sich keine Biegelinie aus, weil die Kräfte fast ausschließlich per Schub übertragen werden.

Es müssten zukünftig Tests zu den einzelnen Lastpfaden, die in Insertlasteinleitungen wirken, vorgenommen werden. Dies sind Tests unter transversaler Belastung zur Schubanbindung des

Insertkörpers an den Kern sowie zur Deckschichtanbindung über die Insertkragen als auch Versuche unter flächenparalleler Belastung zur Lochleibungsfestigkeit der Deckschichten.

4.9.4 Testdokumentation

Aus den Erfahrungen, die mit mechanischen Tests an Insertlasteinleitungen im Projekt InGa gemacht wurden können die folgenden Empfehlungen abgeleitet werden:

- Die Mess- und Dokumentationseinheiten müssen getriggert werden bzw. gleichzeitig per Signal eingeschaltet werden können, so dass akustische und visuelle Phänomene eindeutig bestimmten Kräften bzw. Verformungswegen zugeordnet werden können.
- Für die präzise Bestimmung der Erstversagenslast von Insertlasteinleitungen unter transversaler Belastung werden in den entsprechenden Literaturquellen unterschiedliche Verfahren angewandt. Für zukünftige experimentelle Untersuchungen muss eines der folgenden Verfahren ausgewählt und als Basisverfahren bei allen Versuchen zur Anwendung kommen:
 - Bei sogenannten Hysteresetests werden nacheinander unterschiedliche Kraftniveaus angefahren und anschließend wieder entlastet. Eine Abweichung des Hin- und Rückverlaufs der Kraft-Weg-Kurve wird als Indikator für den Beginn plastischer Umwandlung von Energie (also einer Schädigung des Versuchskörpers) genutzt. So kann z. B. identifiziert werden, ob ein Knistern durch eine unkritische, elastische Verformung oder durch eine irreversible Schädigung hervorgerufen wurde.
 - Nutzung des Schnittpunkts mit der 0,2%-Geraden mit der Kraft-Weg-Kurve zur Identifikation der Lasthöhe bei Erstschädigung.
 - Nutzung der akustischen Auswertung: Bei einigen Tests war bereits weit vor dem ersten Kraftmaximum im linearen Bereich ein Knistern zu hören, das ebenfalls auf ein Versagen einzelner Wabenwände durch Schubbeulen hinweisen könnte.

5 Literaturverzeichnis

1. **Schürmann, Helmut.** *Konstruieren mit Faserverbund.* Darmstadt : Springer Verlag, 2004.
2. **Huber, Ulrich.** *Sandwichtechnologie Aufbaukurs SS 2006.* HAW Hamburg : (Vorlesungsskript), 2006.
3. **Hexel Composites.** *HexWeb Honeycomb Sandwich Design Technology.* Duxford : s.n., 2000. Broschüre .
4. **Hexcel Composites.** *Sandwich Panel fabrication technology.* Duxford : s.n., 2001. Broschüre.
5. **Ermanni, Paolo.** *Verbindungstechnologien für FKV 07v1.0.* ETH Zürich, IMES-ST : s.n., 2010.
6. **Heimbs, Sebastian und Pein, Marc.** *Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts.* EADS Innovation Works. *Composite Structures* 89 : Elsevier, 2009. S. 575–588, Paper.
7. **Ermanni, Paolo.** *Verbindungstechnologien für FKV 07 v1.0.* [Hrsg.] IMES-ST ETH Zürich. [Skript zur Vorlesung]. Zürich, Schweiz : s.n., 2010.
8. **Kempf, Alexander.** *Entwicklung einer mechanischen Verbindungstechnik für Sandwichwerkstoffe.* Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen : s.n., 2004. Dissertation.
9. **Bianchi, G., Aglietti, G. S. und Richardson, G.** *Optimization of bolted Joints connecting Honeycomb Panels.* University of Southampton, School of Engineering Sciences : NN, 2006. Paper.
10. **Roy, R., et al., et al.** Testing and modeling of Nomex™ honeycomb sandwich panels with bolt insert. [Hrsg.] Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University Department of Aerospace Engineering. *Composites: Part B.* [Paper]. s.l., South Korea : Elsevier Science Ltd. , 2014. Bd. 56, S. 762 – 769. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.006>.
11. **Nguyen, Khanh-Hung, et al., et al.** Failure behaviour of foam-based sandwich joints under pull-out testing. [Hrsg.] Research Centre for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam Department of Aerospace Engineering. *Composite Structures.* [Paper]. Gyeongnam, South Korea : Elsevier Science Ltd. , 2012. Bd. 94, S. 617 - 624. doi:10.1016/j.compstruct.2011.08.027.
12. **Kim, Byoung Jung und Lee, Dai Gil.** Development of a satellite structure with the sandwich T-joint. [Hrsg.] Korea Advanced Institute of Science and Technology Department of Mechanical Engineering. *Composite Structures* 92. s.l., Korea : Elsevier Ltd, 2009. Bd. 92. Paper.
13. **Thomsen, Ole Thybo.** Analysis of sandwich panels with through-the-thickness inserts using a higher-order sandwich plate theory. [Hrsg.] ESA/ ESTEC/YME Noordwijk. *ESTEC Working Paper: EWP 1807.* Noordwijk, The Netherlands : ESA, 1994. Bezogen über: University of Bristol Library.
14. **Thomsen, O. T.** Analysis of sandwich plates with fully potted inserts using a higher order sandwich plate theory. [Hrsg.] A. Vautrin. *Mechanics of Sandwich Structures 1998 Proceedings of the EUROMECH 360 Colloquium held in Saint-Étienne, France, 13–15 May 1997.* [Kollektion Konferenzpaper]. s.l. : Kluwer Academic Publishers, 1998. S. 407-414. ISBN 978-90-481-5027-4.
15. **ECSS European Cooperation for Space Standardization.** *Space Engineering Insert Design Handbook.* [Hrsg.] ESA-ESTEC. Noordwijk : s.n., 2011. Bde. ECSS-E-HB-32-22A.
16. **Thomsen, Ole Thybo.** Sandwich plates with 'through-the-thickness' and 'fully potted' inserts: Evaluation of differences in structural performance. [Hrsg.] Aalborg University Institute of Mechanical Engineering. *Composite Structures.* [Zeitschrift]. Aalborg, Denmark : Elsevier Science Ltd., 1998. Bd. 2, Vol. 40, S. 159 - 174. PII: S0263-8223(98)00017-8.
17. **Raghu, Nikhil, Battley, Mark und Southward, Temoana.** Strength Variability of Inserts in Sandwich Panels. [Hrsg.] Centre for Advanced Composite Materials (CACM) University of

Auckland. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. [Paper]. Auckland, New Zealand : Sage publications LTD, 2009. Bd. 11, 6, S. 501-517.

18. **Thomsen, O. T. und Rits, W.** Analysis and design of sandwich plates with inserts—a high-order sandwich plate theory approach. [Hrsg.] Aalborg University Institute of Mechanical Engineering. *Composites Part B*. [Paper]. Aalborg, Denmark : Elsevier Science Ltd. , 05 1998. Bd. 29B, S. 795-807. PII: S1359-8368(98)00019-5.

19. **Bianchi, G. und Aglietti, G. S.** Static performance of hot bonded and cold bonded inserts in honeycomb panels. [Hrsg.] University of Southampton School of Engineering Sciences. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. [Paper]. s.l., UK : Sage publications Ltd., 2010. Bd. 0, S. 1099-6362. DOI: 10.1177/1099636209359840.

20. **Zenkert, Dan.** *The Handbook of Sandwich Construction*. s.l. : Engineering Materials Advisory Services Ltd, 1997. 1. Auflage . ISBN 0 9478 17 96 4.

21. **SELL GmbH, Prinz, J. und Bösser, K.** *General honeycomb sandwich compound Issue: 5, Application general*. SELL GmbH. Herborn : s.n., 21.10.2010. Allowable. W0-320-001.

22. **Gurit GmbH.** *PF 808 Self-adhesive phenolic prepreg*. [Hrsg.] Gurit GmbH. 2014. Datenblatt . PDS-PF808-1-0414.

23. **Schütz GmbH & Co. KGaA.** *Coremaster N636 Wabenkernmaterial*. Selters : s.n. Datenblatt.

24. **ECSS.** *Insert design handbook*. [Hrsg.] ESA-ESTEC. Noordwijk : s.n., 2011. Bde. ECSS-E-HB-32-22A.

25. **Wolff, Johannes.** 2015-08-04 *Dichte- und Flächengewichtbestimmung_616+618_HC_v02_JWo.xlsx*. DLR Braunschweig, FA-FLB : s.n., 2015.

26. **VDI (Verein deutscher Ingenieure).** Systematic calculation of high duty bolted joints - Joints with one cylindrical bolt. [Hrsg.] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb. *VDI-Richtlinien*. s.l., Germany : Beuth Verlag GmbH, 2003. ICS 21.060.10.

27. **Würth GmbH.** Technische Informationen zu Verbindungselementen. s.l. : Würth GmbH.

28. **Schürmann, H. und Elter, A.** Beitrag zur Gestaltung von Schraubverbindungen bei Laminaten aus Faser-Kunststoff-Verbunden. [Hrsg.] Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen TU Darmstadt. *Konstruktion*. [Zeitschrift]. Januar7Februar 2013. S. 62 -66.

29. **Friedrich, C. und Hubbertz, H.** Friction behavior and preload relaxation of fastening systems with composite structures. [Hrsg.] Institute of Engineering Design MVP, University of Siegen Dep. of Mech. Eng. *Composite Structures*. [Zeitschrift]. Siegen, Germany : Elsevier Ltd., 2013. Bd. 110, S. 335 - 341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.11.024>.

30. **Illgner, K. H. und Essner, J.** *Schrauben Vademecum*. [Hrsg.] Textron Verbindungstechnik GmbH & Co. Neuwied : Rasch Verlag, 2001. ISBN 3-935326-46-7.

31. **Muhs, Dieter, et al., et al.** Roloff / Matek Maschinenelemente. [Buch]. Wiesbaden, Germany : Vieweg & Sohn Verlag , 2003. 16, S. 790. ISBN 3-528-07028-05.

32. **Nord-Lock GmbH.** Nord Lock Bolt securing system - Technische Informationen. [Hrsg.] Nord-Lock GmbH. [Katalog]. Westhausen, Deutschland : s.n., 2010. Katalog Schraubensicherungen.

33. **3M Scotch-Weld.** *Technical data sheet Structural Adhesive 9300 B/A FST*. 2011.

34. **3d-prototyp GmbH.** ULTEM 9085 Materialeigenschaften. [Datenblatt]. 2015. S. 1. <http://www.3d-prototyp.com>.

35. **Buderus SELL GmbH (heute: SELL GmbH).** *Design Values Report Panel Inserts D0-001-120E*. Herborn : s.n., 1993. Prüfbericht VERTRAULICH.

36. —. *Design Values Report Panel Inserts D0-001-130E*. Herborn : s.n., 1993. Prüfbericht, VERTRAULICH.

37. **Buderus SELL GmbH, Seeburger, G. W. und Schetat, H.-J.** *Design Values Report, Restraining devices, D0-001-140E*. Herborn : s.n., 1993. F 1000.

38. **Buderus Sell GmbH, Seeberger, G. W. und Schetat, H.-J.** *Design Values Report, Panel Inserts, D0-001-130E*. Herborn : s.n., 1993. Prüfbericht, VERTRAULICH.
39. **Buderus SELL GmbH, Seeburger, G. W. und Schetat, H.-J.** *Design Values Report, Restraining devices D0-001-140E*. Herborn : s.n., 1993. D0-001-140E.
40. **SELL GmbH Bösner, Daniel; Krämer, Tobias.** 120209_InGa-Teilprojekt-DLR-Kick-off.pptx. [Präsentation]. Herborn, Germany : s.n., 09. 02 2012.
41. —. 120511_InGa_Statusmeeting_Berlin_DH.ppt. [Präsentation]. Berlin, Germany : s.n., 11. 05 2012. Statusmeeting Projekt InGa.
42. **Krämer, Tobias und Wolff, Johannes.** 2013-07-15_Innovative Inserts - Anforderungen für Demonstrator_v0.5_ToKr_JoWo.doc. Herborn / braunschweig : s.n., 2013.
43. **Lim, Jun Woo und Lee, Dai Gil.** Development of the hybrid insert for composite sandwich satellite structures. [Hrsg.] Elsevier. *Composites: Part A* 42. 2011, A 42, S. 1040-1048.
44. **Böllhoff Verbindungstechnik GmbH, DELO Industrie Klebstoffe.** Onsert - Schnelles, prozesssicheres Fügen von. [Broschüre]. Bielefeld, Germany : s.n., 2011.
45. **SELL GmbH Bösner, Daniel; Krämer, Tobias;** . 20130606 DLR+ZPG innov Panel + interg Beleuchtung DBH.pptx. [Präsentation]. Statusmeeting Herborn : s.n., 06. 06 2013. Präsentation SELL.
46. **SELL GmbH Bösner, Daniel; Krämer, Tobias.** Shoptour Fertigung. [Foto]. Herborn, Germany : s.n., 03. 04 2013.
47. **Trzesniowski, M.** *Rennwagentechnik Grundlagen, Konstruktion, Systeme*. [Hrsg.] ATZ/MTZ-Fachbuch. 2. Auflage. Graz : Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien, 2010.
48. **Thompson, R. W., Matthews, F. L. und O'Rourke, B. P.** Load attachment for honeycomb panels in racing cars. [Hrsg.] Imperial College, London Centre for Composite Materials. *Materials & Design*. 1995, Volume 16 , S. 131 - 136.
49. **Sicom Epoxy Systems.** *Datenblatt SR 1710 Injection - Strukturelles Epoxy System für Infusion / Injektion Resin Transfer Moulding (RTM)*. [Hrsg.] TimeOut Composites. 2005.
50. **Seemann, Ralf und Krause, Dieter.** Virtual testing of Nomex honeycomb sandwich panel inserts. [Hrsg.] Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH) Institute of Product Development and Mechanical Engineering Design. *20th International Conference on Composite Materials*. [Paper]. Copenhagen, Denmark : 20th International Conference on Composite Materials, 2015.
51. **Bunyanichakul, P., Castanie, B. und Barrau, J.-J.** Experimental and numerical analysis of inserts in sandwich structures. [Hrsg.] LMS Sup'Aéro, Toulouse IGMT. *Applied Composite Materials*. [Paper]. Toulouse, France : Springer, 2005. Bd. 12, S. 177 - 191. DOI: 10.1007/s10443-005-1122-6.
52. **Choi, Ji-Young, et al., et al.** An investigation on the strength of insert joints of composite-honeycomb sandwich structures. [Hrsg.] Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam School of Mechanical and Aerospace Engineering. [Paper]. 2008. S. 26 - 33. Language: Korean.
53. **Park, Yong-Bin, Kwon, Jin-Hwe und Choi, Jin-Ho.** Failure characteristics of carbon/BMI-Nomex sandwich joints in various hygrothermal conditions. [Hrsg.] Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam Department of Aerospace Engineering. *Composites: Part B*. [Paper]. Gyeongnam, South Korea : Elsevier Science Ltd. , 2014. Bd. 60, S. 213–221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.12.035>.
54. **Song, Keun-Il, et al., et al.** *An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures*. Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea. *Composite Structures* 86 : s.n., 2008. S. 107–113, Paper.
55. **Buderus Sell GmbH, Seeburger, G. W. und Schetat, H.-J.** *Design Values Report, Panel Inserts, D0-001-120E*. Herborn : s.n., 1993. Prüfbericht VERTRAULICH.

56. **Wolff, Johannes** . 2014-09-11_InGa_Auswertung_SELL-Inserttests_v0-39_FA-FLB_JWo_FFT.xlsx. [Hrsg.] DLR BS FA-FLB. [Excel Tabellenkalkulation]. Braunschweig, Niedersachsen, Deutschland : s.n., 2014.
57. **Ermanni, Paolo und Kress, Gerald**. *Leichtbau III Faserverbundstrukturen*. ETH Zürich, Zentrum für Strukturtechnologien : s.n., 2004.
58. **Berggreen, Christian, et al., et al.** *Improving Performance of Polymer Fiber reinforced Sandwich X-Joints in Naval Vessels*. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering : s.n., 2007. Paper Part 1.
59. **Feldhusen, J. und Kempf, A.** *Methodische Entwicklung einer mechanischen Verbindungstechnik für Sandwichelemente*. Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik, RWTH Aachen. Konstruktion 9/2004 Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe : Springer VDI Verlag , 2004. S. 59 -62, Paper.
60. **Bunyawanchakul, P., Castanié, B. und Barrau, J.-J.** *Non-linear finite element analysis of inserts in composite sandwich structures*. Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Bangkok. Composites: Part B 39 : Elsevier, 2008. S. 1077–1092, Paper / Fachaufsatz.
61. **Shur-Lok Company** . *Fasteners for Sandwich Structure Catalog*. 1999. Katalog.
62. **Block, J., et al., et al.** *Carbon Fibre Tube Inserts - A Light Fastening Concept with high load carrying Capacity*. DLR - Inst. of Composite Structures & Adaptive Systems. Braunschweig, Germany : s.n., 2005. Paper.
63. <http://www.eiffel.de/nc/printversion/sonderkonstruktionen-systembruecken/systembruecken>. www.eiffel.de. [Online]
64. **SELL GmbH Bösser, Daniel; Krämer, Tobias**. 2013-04-04_Sandwichkrafteinleitungselemente_SELL_TKr.pptx. [Präsentation]. Herborn, Germany : s.n., 05.04.2013.
65. **SAERTEX® GmbH & Co. KG**. *Datenblatt_GF_UD_S35EQ260_quadrax_Saertex_DB_2011.pdf*. D-48369 Saerbeck : s.n., 2011.
66. **Wolff, Johannes**. 2014-08-01_InGa_TestMatrix_Inserts_v35_JWo.xlsx. DLR FA FLB. Braunschweig : s.n., 2014. Exceltabelle.
67. **Buderus SELL GmbH, et al., et al.** *Design Values Report, Structural Joints, D0-001-130E*. Buderus-SELL GmbH. Herborn : s.n., 25.01.1993. Allowable. D0-001-130E, F1000.
68. **Schütz GmbH & Co. KGaA**. *CoreMaster Wabenkernmaterial*. Selters : s.n., 2014.
69. **Böllhoff Verbindungstechnik GmbH & Co. KG , DELO Industrie Klebstoffe**. Onsert - Schnelles, prozesssicheres Fügen von. [Broschüre]. Bielefeld, Germany : s.n., 2011.
70. **Frostig, Y., et al., et al.** High order theory for sandwich-beam behaviour with transversely flexible core. [Hrsg.] Fac. of Civ. Engrg. Technion, I.I.T., Haifa Sr. Lect. *Journal of Engineering Mechanics*. [Paper]. Haifa, Israel : ASCE, 1992. Bd. 118, 5, S. 1026 - 1043. ISSN 0733-9399/92/0005-1026.
71. **Skvortsov, Vitaly und Thomsen, Ole Thybo**. Analytical estimates for the stresses in face sheets of sandwich panels at junctions between different core materials. [Hrsg.] State Marine Technical University of St. Petersburg. *Conference on Sandwich Structures 2002*. [Paper]. St. Petersburg, Russia : s.n., 2002. S. 551 - 559.